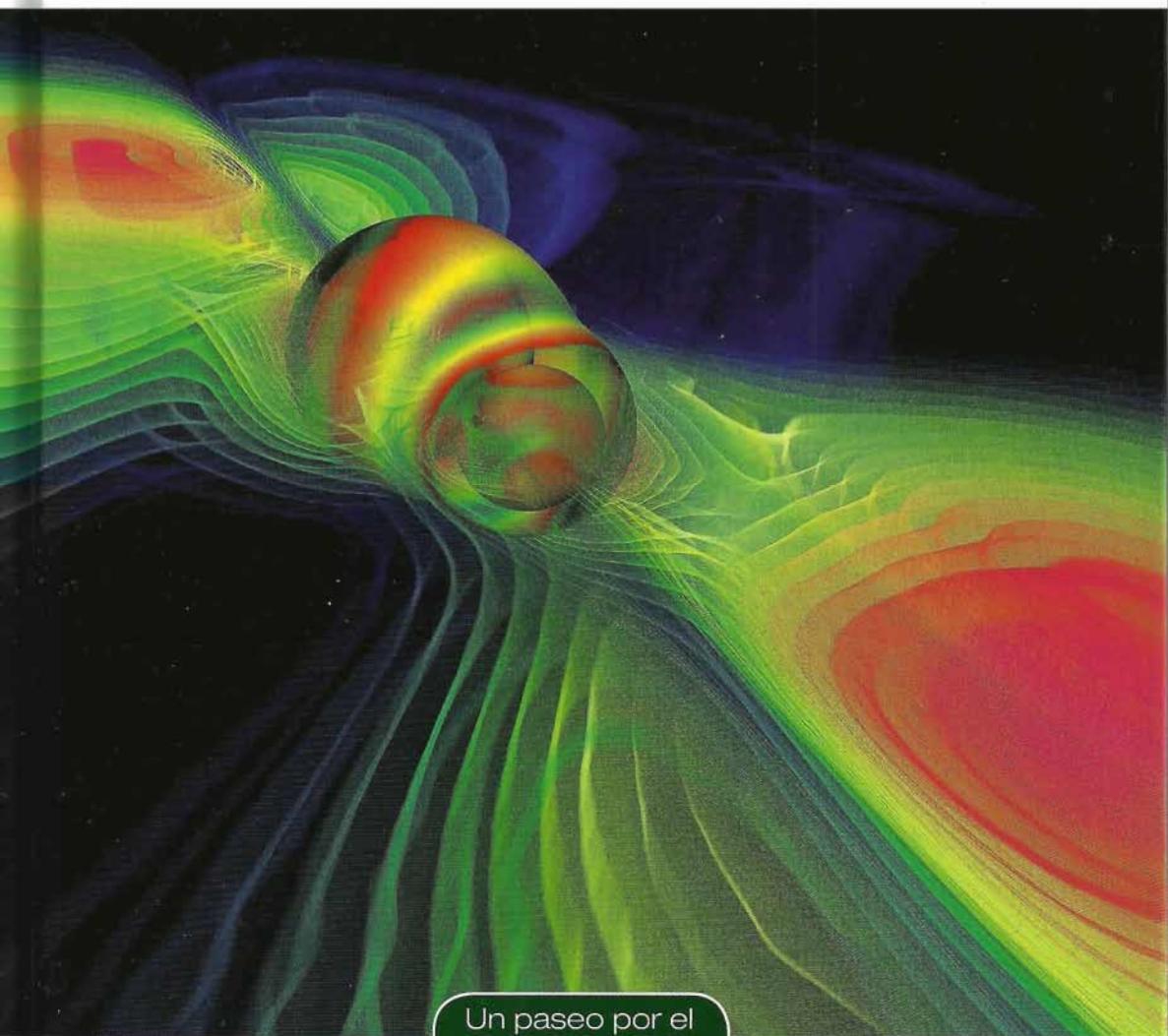


Grandes experimentos de la física

El método científico
llevado al límite



Un paseo por el
COSMOS

EXLIBRIS Scan Digit



The Doctor y La Comunidad

Redigitalización: The Doctor

<http://thedoctorwho1967.blogspot.com.ar/>

<http://el1900.blogspot.com.ar/>

<http://librosrevistasinteresesanexo.blogspot.com.ar/>

<https://labibliotecadeldrmoreau.blogspot.com/>

Grandes experimentos de la física

El método científico
llevado al límite

RBA

Imagen de cubierta: Simulación de la coalescencia de dos agujeros negros y de las ondas gravitatorias que se generan en dicho proceso.

Dirección científica de la colección: Manuel Lozano Leyva

© Antonio Lallena Rojo por el texto
© RBA Contenidos Editoriales y Audiovisuales, S.A.U.
© 2016, RBA Coleccionables, S.A.

Realización: EDITEC

Diseño cubierta: Llorenç Martí

Diseño interior: tactilestudio

Infografías: Joan Pejoan

Fotografías: Album/Mario De Biasi: 129; Archivo RBA: 59, 122, 125a, 125b; Frank Behnsen/Wikimedia Commons: 93; Maximilien Brice, CERN: 113b; CCFE/JET/EUOfusion Consortium: 41b; Erik Dunham: 63; Justin Knight: 109; LIGO Collaboration: 75a, 75b; William Lítant/MIT: 54; Genevieve Martin/ORNL: 135; MPI for Gravitational Physics/W.Benger-Zib: portada; NASA/ESA/STScI: 28; NASA/JPL: 71; NASA/JPL-Caltech: 57; National Archives and Records Administration/AIP Emilio Segrè Visual Archives: 125ad; PPPL (Princeton Plasma Physics Laboratory): 41a; A. Saba/CERN: 113a; The Sudbury Neutrino Observatory (SNO): 141; Tennessee Valley Authority: 25.

Reservados todos los derechos. Ninguna parte de esta publicación puede ser reproducida, almacenada o transmitida por ningún medio sin permiso del editor.

ISBN: 978-84-473-8666-6
Depósito legal: B-20369-2016

Impreso y encuadernado en Rodesa, Villatuerta (Navarra)
Impreso en España - *Printed in Spain*

SUMARIO

INTRODUCCIÓN	7
CAPÍTULO 1	Buscando energía desesperadamente 13
CAPÍTULO 2	Las arrugas del espacio-tiempo 47
CAPÍTULO 3	¿De qué está hecha la materia? 79
CAPÍTULO 4	Partículas fantasmagóricas 117
LECTURAS RECOMENDADAS	147
ÍNDICE	149

Son muchas las características que se han aducido para establecer diferencias entre el ser humano y el resto de los animales. El lenguaje, entendido como medio de intercambio de información, se ha considerado en muchas ocasiones con tal fin, aunque existen indicios que señalan que la comunicación entre los congéneres de algunas otras especies se lleva a cabo con algún tipo de signos codificados que podría tener cabida en ese amplio contexto.

Sin embargo, uno de los aspectos que posiblemente no tenga parangón en el ámbito zoológico, al menos hasta donde hoy sabemos, es el afán por buscar, primero, e investigar y desentrañar, a continuación, aquellos mecanismos fundamentales por los que se rigen todos los eventos que la naturaleza ofrece a nuestros sentidos. Ese interés por desenmarañar cómo y por qué ocurre lo que sucede día a día en nuestro entorno, en el más amplio sentido que podemos darle a ese término, ha constituido una de las veredas por las que se ha conducido la evolución de la humanidad desde sus albores, erigiéndose como una de sus peculiaridades más identificativas.

Las ciencias, surgidas de esas aspiraciones de conocimiento, han permitido organizar la información obtenida y establecer los

procedimientos para su correcto análisis, dando como fruto un sofisticado mecanismo de verificación o refutación de teorías, una herramienta básica en la búsqueda del entendimiento: el *método científico*.

Aquí vamos a lidiar con una de esas ciencias: la física. Física es una palabra que deriva del griego antiguo: φυσικός, la «naturaleza». Ese es pues el objeto de estudio de esta disciplina científica que tiene por «mandato» establecer cómo está formada toda la materia presente en el universo, cuáles son los procesos que rigen su evolución en el espacio y en el tiempo y cómo aquellos están relacionados con las fuerzas que actúan y con la energía puesta en juego en los mismos. Podríamos, por tanto, decir que, en definitiva, la física persigue la explicación de todo aquello que puede ser observado.

La palabra clave es, pues, *observación*. Esa es la base sobre la que se fundamenta todo el trabajo que hasta hoy día se ha llevado a cabo en el ámbito de la física. Además, el procedimiento seguido es conceptualmente simple: se trata sencillamente de diseñar experimentos que, al menos *a priori*, nos permitan «ver» los efectos en los que estamos interesados, registrar los resultados de las medidas que los dispositivos experimentales contruidos para su detección nos permitan realizar y, finalmente, interpretar esos resultados a la luz de algún modelo o teoría, de manera que sea posible desentrañar los mecanismos que rigen los procesos básicos involucrados en esos experimentos. Y, si tal modelo o teoría no están disponibles, o bien los resultados empíricos se empecinan en descartar aquellos que sí lo estén, será preciso desarrollar unos nuevos, incorporando en ellos el conocimiento adquirido. Si, como también ocurre en muchas ocasiones, el experimento diseñado tiene como objetivo último comprobar una teoría o un modelo ya establecidos para un determinado proceso, serán precisamente sus predicciones lo que se pretenderá validar o falsar a partir de los resultados experimentales que se encuentren.

Por tanto, la física, en este sentido, va más allá de la escueta observación, resultando más bien sinónima de la «experimentación», uno de los fundamentos del método científico al que antes

nos hemos referido. Y es precisamente a algunos experimentos particulares a los que está dedicado este libro. Más concretamente, vamos a examinar «grandes experimentos de la física», entendiendo aquí el calificativo en su acepción de dimensión espacial, es decir, vamos a analizar instalaciones experimentales de tamaños colosales, que solo han podido ver la luz gracias a un formidable esfuerzo cooperativo de numerosos científicos e ingenieros de diferentes nacionalidades y una importante financiación internacional. Pero, lejos de estar reñidos con la «grandeza» científica, estos experimentos concitan una excelencia intelectual fuera de toda duda, que garantiza la consecución de avances no solo científicos sino, en muchos casos, también de carácter pragmático para la sociedad.

El primero de ellos no ha entrado aún en funcionamiento, pero es posible asegurar que de sus resultados dependerá de manera relevante cómo enfrentará la humanidad su evolución en un futuro próximo. La producción de energía es uno de los problemas fundamentales a resolver hoy día y cabe señalar, sin temor a exagerar, que requiere que lo sea más pronto que tarde, ya que las actuales fuentes energéticas están alcanzando niveles tales que, o bien tienen una duración muy cortoplacista, o bien interactúan de manera agresiva con el medio ambiente, o bien no permiten garantizar la satisfacción de nuestras necesidades actuales, cuando menos las que estén por venir. La instalación de la que estamos hablando es el ITER que, con toda seguridad, supondrá un hito en este sentido. El ITER se ha diseñado para facilitar el pasaje entre los experimentos de producción de energía de fusión realizados hasta la fecha y el primer prototipo realista de producción de energía de fusión a nivel industrial, abriendo así, de manera definitiva, la puerta hacia la consecución del sueño de esta fuente de energía casi «limpia e indefinida», que nos ha acompañado desde hace ya casi un siglo.

Bastantes de los experimentos más importantes de la física de los últimos tiempos se han hecho para indagar en la evolución del universo, y también para poner a prueba la teoría que en la actualidad mejor describe dicha evolución, la teoría de la relatividad general. Las predicciones de esta teoría, formulada por Einstein

a principios del siglo xx, se han ido verificando con precisión más que notable. La última de ellas, la que hace referencia a la existencia de ondas gravitatorias, ha podido ser comprobada recientemente en una instalación denominada LIGO y que solo cabe catalogar como impresionante. La precisión lograda en los dos observatorios interferométricos que constituyen el experimento está en los límites de lo que es posible conseguir con la instrumentación y la tecnología actuales. Y los resultados obtenidos son admirables por su simplicidad, lo que está en consonancia con la sencillez conceptual del dispositivo experimental que, no obstante, ha requerido de un esfuerzo técnico sin precedentes. La repercusión que los resultados de este experimento puedan tener en el modelo de universo admitido en la actualidad se verá en los próximos años. En esa línea jugarán un papel muy importante las nuevas vías de obtención de información sobre eventos a escala del universo que prometen abrirse con esta técnica experimental que tan verosímil se ha mostrado. Y cuando empecemos a discernir la nueva información que pueda obtenerse, habrá que prestar atención a las posibles modificaciones del paradigma, tal y como hoy día lo conocemos, a las que esa información pueda dar lugar.

El LHC es otro «gran experimento», que destaca además por la enormidad de sus instalaciones. Este acelerador de partículas, el mayor y más potente de todo el mundo, fue construido en el CERN con el objetivo, entre otros, de encontrar el bosón de Higgs, es decir, de demostrar la existencia de la única partícula que aún no había sido descubierta de todas las que forman parte del modelo estándar, la teoría que describe nuestro conocimiento actual acerca de cuáles son los constituyentes fundamentales de la materia y cuáles son las interacciones que se ponen en juego entre ellos. Apenas cuatro años después de entrar en funcionamiento, y a pesar de un incidente técnico que lo mantuvo inactivo durante varios meses, los equipos de dos de los experimentos que se llevan a cabo en él notificaron la observación de una partícula compatible con las características que debía tener la que se estaba buscando. No cabe duda de que, conseguido uno de sus grandes objetivos, el LHC va a permitir profundizar en la fiabilidad del modelo estándar y, ¡cómo no!, recabar nueva información que,

o bien ratifique lo que dicho modelo establece o bien requiera de una nueva teoría. Cualquiera de los escenarios será realmente fascinante.

Otros experimentos igual de atractivos tendrán en los próximos años la misión de acotar las propiedades físicas de las más elusivas de las partículas elementales hoy día conocidas: los neutrinos. La enorme dificultad que conlleva su detección no ha sido óbice para que, desde que fueron propuestas teóricamente allá por 1930, se hayan construido distintas instalaciones enfocadas al estudio del comportamiento de estas partículas y de sus características fundamentales, en particular, su masa. Las técnicas desarrolladas en torno a los neutrinos constituyen uno de los conjuntos de procedimientos más extenso y rico de la historia de la física y, como veremos, la imaginación de los científicos no se ha detenido en lo que respecta a este candente tema de investigación. Los resultados que nos depararán las más recientes instalaciones dedicadas a los neutrinos serán, con seguridad, y como lo han sido todos los obtenidos para estas partículas hasta el presente, más que sorprendentes.

Para apreciar las razones que han llevado a la comunidad científica a proponer y construir estas instalaciones, así como el impacto de los resultados experimentales a que han dado (o darán) lugar, no nos restringiremos a los experimentos concretos, sino que trataremos de exponer y analizar también los hechos históricos que los precedieron. Y ello sin renunciar, en cualquier caso y como no podría ser de otra forma, a indagar sobre la física básica que se ha pretendido (o se pretende) comprobar, descubrir o demostrar con ellos. Creemos que estas cuestiones relacionadas con la física implicada en los problemas bajo estudio, en todos y cada uno de los experimentos que vamos a analizar, y con la propia historia de los mismos, no son en absoluto desdénables, puesto que solo desde una perspectiva amplia que las involucre es posible aprehender los detalles fundamentales de esos experimentos que de otra forma quedarían ocultos bajo los múltiples aspectos técnicos de los mismos.

Buscando energía desesperadamente

Casi toda la actividad humana se basa en la utilización de energía, un «bien» que ni se crea ni se destruye, y que solo es posible transformar. Difícil de producir, su almacenamiento eficiente a gran escala es casi imposible y ello genera un «problema energético» que está propiciando la búsqueda desesperada de fuentes sostenibles.

Es curioso cómo los escenarios que prevén la mayoría de los relatos y películas futuristas repiten una y otra vez dos tipos de situaciones. Uno es el estilo *Mad Max* en el que la humanidad ha llegado a una situación de total penuria energética y en el que el *leitmotiv* del día a día no es otro que la lucha por conseguir combustible a costa de cualquier cosa, vida humana incluida. El otro tiene su representante paradigmático en *La guerra de las galaxias* y en él todos los problemas de abastecimiento energético están más que solventados, las naves son capaces de viajar a la velocidad de la luz de manera cotidiana y las preocupaciones de la humanidad marchan por derroteros algo más esotéricos. Sin embargo, la generación de energía es un problema cada día más acuciante y lo que el futuro nos deparará es, cuando menos, incierto. A pesar de ello contamos con una esperanza, la *fusión termonuclear*, y con un experimento que nos permite cierto optimismo al respecto.

El 21 de noviembre de 2006 se firmó un acuerdo internacional que abrió una etapa esperanzadora en la búsqueda de una fuente de energía sostenible para el futuro. Ese día, en París, un consorcio internacional formado por China, Estados Unidos, India,

Japón, Corea, Rusia y la Unión Europea aprobó el acuerdo formal del proyecto del Reactor Experimental Termonuclear Internacional (ITER, por sus siglas en inglés). Casi un año después, el 24 de octubre de 2007, la organización comenzaba su andadura. Y es que *iter*, en latín, significa «camino» o «viaje», lo que concede al proyecto, a través de su propia denominación, una imagen palmaria de lo que se requerirá para culminar sus objetivos y de la ambición inherente a este gran experimento.

Pero la historia del ITER, como no podía ser de otra manera, se remonta a bastante tiempo antes. Con la Guerra Fría dando sus últimos coletazos, Ronald Reagan, entonces presidente de Estados Unidos, y Mijaíl Gorbachov, a la sazón secretario general del Partido Comunista de la Unión Soviética, se encontraron personalmente por vez primera durante los días 19 y 20 de noviembre de 1985, en Ginebra, con la intención de mantener conversaciones sobre cuestiones diplomáticas y, lo que era más importante, la carrera armamentística. Entre los tira y afloja relativos a los temas de relevancia, Gorbachov convenció a Reagan de que sería provechoso colaborar para disponer de la fusión nuclear como fuente de energía. El documento publicado el 21 de noviembre sobre el encuentro contenía 13 puntos; el último rezaba así: «Investigación sobre fusión. Los dos líderes enfatizaron la potencial importancia del trabajo dirigido a la utilización de la fusión termonuclear controlada con fines pacíficos y, en consecuencia, abogaron por el más amplio desarrollo posible de una cooperación internacional para obtener esta fuente de energía, que es esencialmente inagotable, para el beneficio de toda la humanidad».

Esta breve declaración de intenciones no cayó en saco roto y contó con el decidido impulso de dos personajes que merecen ser destacados: Alvin Trivelpiece, Director de la Oficina de Investigación de la Energía en el Departamento de Energía de Estados Unidos, y Yevgueni Velikov, asesor científico de Gorbachov y amigo personal suyo. Así, en 1987, Estados Unidos, Japón, la Comunidad Europea de la Energía Atómica (después la Unión Europea) y la Unión Soviética alcanzaron un acuerdo para abordar el proyecto, cuyo diseño se inició al año siguiente y

se culminó en 2001. China y Corea se unieron al grupo dos años más tarde, India se incorporó en 2005 y Suiza lo hizo en 2009.

En 2005, se tomó una decisión importante: el ITER se instalaría en Cadarache, uno de los centros de investigación y desarrollo de energía nuclear más importantes de Europa, situado a poco más de cuarenta kilómetros de Aix-en-Provence, la capital de la Provenza, al sur de Francia. El centro de Cadarache se creó en 1959 y cuenta con diversas instalaciones en las que se abordan no solo problemas de carácter nuclear (tanto de fisión como de fusión), sino también relativos a las energías alternativas (producción de hidrógeno y combustibles sintéticos, energía solar fotovoltaica y biomasa) y otras disciplinas del ámbito de la biología (fisiología vegetal, radiobiología y microbiología). Desarrollan asimismo estrategias para la seguridad y el control de riesgos y estudian el posible impacto ambiental de la actividad nuclear.

El objetivo fundamental del ITER es el de servir de nexo de unión entre las máquinas de investigación, que en el pasado reciente han probado la viabilidad de la fusión como fuente de energía, y las futuras centrales eléctricas de fusión que darán servicio a la sociedad. Para ello en el ITER se espera, por primera vez, poder mantener el proceso de fusión con producción neta de energía durante largos periodos de tiempo, lo que permitirá estudiar en detalle todos los aspectos relevantes del mismo, como son el comportamiento de los materiales empleados, los desarrollos tecnológicos que se deben llevar a cabo y los regímenes físicos que se requerirán para poder generar energía eléctrica de forma comercial.

LA CLAVE ES LA ENERGÍA

Pero antes de profundizar en los detalles de este gran experimento, es necesario desentrañar algunas de las cuestiones básicas que se esconden tras él. Y qué mejor punto de inicio que describir la física básica que se pone en juego en los procesos de fusión nuclear.

Como en todos los eventos que ocupan a la física, la fusión nuclear está gobernada fundamentalmente por la energía. Esta es una magnitud física que mide la capacidad que un sistema tiene para producir trabajo. En otras palabras: los fenómenos físicos se manifiestan en forma de modificaciones del sistema involucrado en los mismos, y esas modificaciones pueden ser desde simples cambios en la posición del sistema o de sus componentes hasta transformaciones de su estado físico, pasando por variaciones de sus propiedades intrínsecas o de sus constituyentes. Esas modificaciones, cuando se producen, están originadas por la realización de un cierto trabajo, bien sea por fuerzas externas al sistema (como cuando un velero es desplazado por la acción del viento) o debido a las fuerzas que puedan ponerse en juego internamente en el propio sistema (como ocurre, por ejemplo, cuando nos movemos de un sitio a otro andando o en bicicleta).

La importancia de la energía estriba en que cualquiera que sea el proceso físico que se esté analizando, la energía total del sistema se conserva. Un tipo de energía puede convertirse en otro, pero no se crea ni se destruye. En el caso antes mencionado, cuando una persona se desplaza caminando, la energía «muscular» que, a su vez, deriva de la energía «química» acumulada a partir de los alimentos ingeridos, se transforma en energía «cinética», asociada con la velocidad que adquiere el caminante, y en energía «térmica», que se acumula en el suelo y en los zapatos y que se debe al rozamiento de estos con aquel, sin el cual no sería posible caminar.

En física, esta propiedad inherente a todos los procesos se conoce como *principio de conservación de la energía total* y tiene implicaciones en cómo esos procesos ocurren. En el caso particular que nos interesa, el de la fusión nuclear, la conservación de la energía establece una restricción fundamental: un proceso no puede llevarse a cabo si la energía total «disponible» en el sistema antes de que suceda es inferior a la que dispondría este tras haberse producido el evento. Veamos un ejemplo.

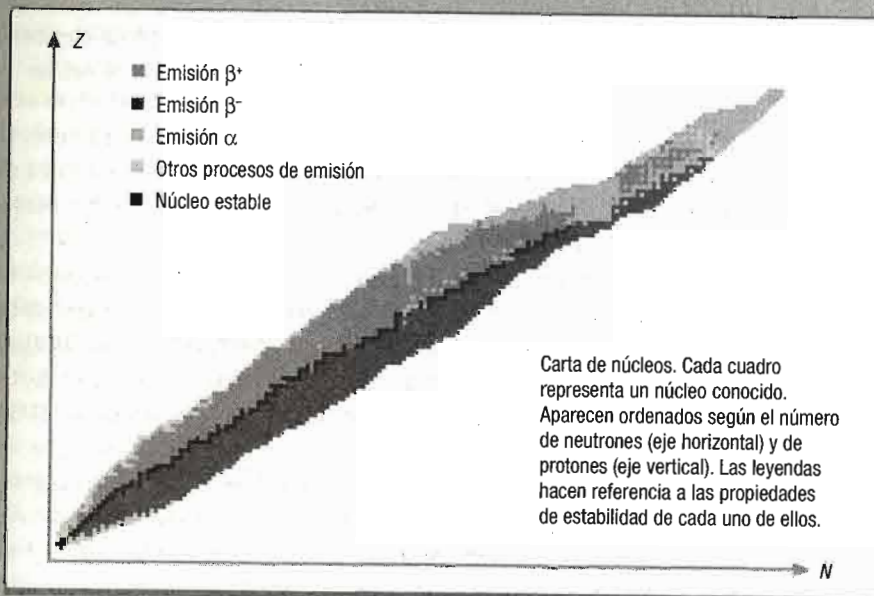
Supongamos que queremos analizar la viabilidad de la fusión de dos núcleos como el $^2_1\text{H}_1$ y el $^3_1\text{H}_2$ en otro de $^4_2\text{He}_2$. La reacción sería la siguiente:

NOMENCLATURA NUCLEAR

La física nuclear es la parte de la física que estudia los núcleos de los átomos. Se trata de agrupaciones de protones y neutrones (denominados indistintamente con el nombre de *nucleones*) que se suelen simbolizar como $^A_Z\text{X}_N$, donde Z es el número atómico, es decir, el número de protones del núcleo, N es el número de neutrones del mismo y $A = Z + N$ es el número másico. X representa el símbolo del elemento químico correspondiente al átomo en el que se encuentra el núcleo en cuestión. Todos los núcleos que tienen el mismo Z y distinto N se denominan *isótopos*, ya que todos ellos se encuentran en la misma posición de la tabla periódica de los elementos.

Organizados en una tabla

Veamos algunos ejemplos. El núcleo de hidrógeno, $^1_1\text{H}_0$, está compuesto en realidad por un único protón; sin embargo los núcleos de los átomos de deuterio, $^2_1\text{H}_1$, y de tritio, $^3_1\text{H}_2$, dos isótopos del hidrógeno, están compuestos respectivamente por un protón y un neutrón, y por un protón y dos neutrones. La mayor parte del carbono natural está compuesta por átomos cuyo núcleo es $^{12}_6\text{C}_6$, con pequeñas cantidades de otros isótopos, como el $^{14}_6\text{C}_8$, que se utiliza en datación de muestras biológicas. El isótopo más abundante en el oxígeno natural es el $^{16}_8\text{O}_8$. Núcleos importantes relacionados con la producción de energía nuclear son el $^{235}_{92}\text{U}_{143}$ y el $^{238}_{92}\text{U}_{146}$. Al igual que los átomos se organizan en la tabla periódica, los núcleos se distribuyen en la *tabla de isótopos*.





donde n indica un neutrón. Si suponemos que los dos núcleos que se fusionan están inicialmente en reposo, la energía disponible antes de la fusión sería

$$E_{\text{inicial}} = m({}^2_1\text{H}_1)c^2 + m({}^3_1\text{H}_2)c^2,$$

donde hemos hecho uso de la conocida ecuación $E=mc^2$ de la *teoría de la relatividad* que establece la equivalencia entre masa y energía. Pues bien, la reacción de fusión que nos interesa no podrá tener lugar si E_{inicial} es inferior a la energía del sistema después de la fusión, que es, como mínimo, la que corresponde a la suma de las masas de los dos productos de la reacción, $m({}^4_2\text{He}_2)c^2 + m_{\text{n}}c^2$. En caso contrario, si la energía disponible antes del proceso es mayor (o igual) que esa energía final mínima, la fusión podría producirse. En física nuclear se denomina valor Q de la reacción a la diferencia entre ambas energías:

$$Q = m({}^2_1\text{H}_1)c^2 + m({}^3_1\text{H}_2)c^2 - m({}^4_2\text{He}_2)c^2 - m_{\text{n}}c^2.$$

Por tanto, la reacción puede ocurrir solo si $Q \geq 0$, y el «exceso» de energía, cuando lo hubiere, se emplearía en dotar de energía cinética al núcleo resultante de la reacción, el ${}^4\text{He}$, y al neutrón, que estarían en movimiento con una cierta velocidad tras el proceso.

Con esta cuestión básica en mente hay dos preguntas relevantes que hacer. La primera es si cualquier reacción energéticamente permitida ocurrirá. La respuesta es que no siempre, ya que podría estar prohibida por otras razones. Es decir, que la condición energética que hemos establecido antes es necesaria,

pero no suficiente. En el caso de la fusión esto es fácil de entender: para que se produzca el proceso los dos núcleos deben entrar en contacto uno con el otro, pero como ambos están cargados positivamente, al acercarlos se repelerán y, por tanto, la fusión solo será posible si antes hemos sido capaces de vencer esa *repulsión electrostática*. Esto constituye uno de los grandes problemas a resolver en la práctica.

La segunda pregunta es: ¿cuáles son pues las reacciones de fusión que están energéticamente permitidas? La respuesta solo puede darse analizando cada reacción concreta. Sin embargo, es posible tener una idea general al respecto analizando una propiedad fundamental de los núcleos atómicos: la *energía de enlace*.

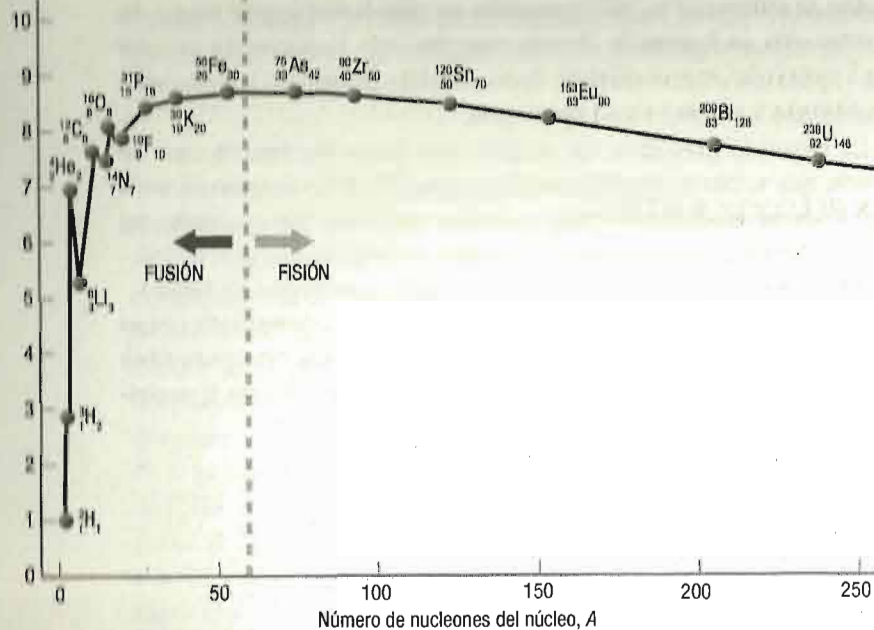
En física se define la energía de enlace como la energía necesaria para disociar un sistema dado en todos sus componentes individuales. En el caso de un núcleo atómico que tenga Z protones y N neutrones la podemos escribir como

$$B(Z, N) = Z m_{\text{p}}c^2 + N m_{\text{n}}c^2 - m(Z, N)c^2,$$

siendo m_{p} y m_{n} las masas del protón y del neutrón, respectivamente, y $m(Z, N)$ la del núcleo en cuestión. La figura 1 nos muestra cómo varía la energía de enlace promedio por nucleón con el número de nucleones, $A = Z + N$. Si no tenemos en cuenta los núcleos más ligeros, vemos que la energía de enlace por nucleón cambia muy poco a medida que A aumenta, tomando valores de entre 7,5 y 8,8 MeV/nucleón, aproximadamente (MeV = megaelectronvoltio). Este efecto es debido a que la fuerza nuclear fuerte, la que mantiene unidos a los nucleones en los núcleos, es de corto alcance, a diferencia de lo que sucede con las interacciones gravitatoria y electromagnética, que tienen alcance infinito. A consecuencia de ello, cada nucleón solo interactúa mediante la fuerza nuclear con unos pocos nucleones cercanos y de ahí la poca variación de la energía de enlace por nucleón. Por tanto, en lo que respecta a esa interacción, no es demasiado relevante el número total de protones y neutrones que tenga el núcleo.

FIG. 1

Energía de enlace por nucleón (MeV/nucleón)



Variación de la energía de enlace media por nucleón con el número de nucleones del núcleo. Solo se muestran explícitamente algunos núcleos.

No obstante, y a pesar de esa casi constancia de la energía de enlace por nucleón, vemos que alcanza un valor máximo para núcleos de tamaño medio, alrededor del Fe (hierro), y que se reduce tanto cuando A aumenta como cuando disminuye. En términos energéticos eso significa que los núcleos con valores de A alrededor de 50-60 son más estables que los restantes (ya que es más costoso separarlos en sus componentes). Y eso tiene importantes implicaciones. Así, energéticamente es viable que núcleos con muchos nucleones, del orden de 200 o más, se rompan en núcleos con menos nucleones que son más estables: estamos hablando de la *fisión nuclear*, el proceso básico que se pone

en juego en los reactores de las actuales centrales nucleares de producción de energía eléctrica.

Pero también es viable desde el punto de vista energético «es- calar» la curva por la parte de la izquierda, la de los núcleos más ligeros. Así, la fusión de dos de esos núcleos da lugar a otro que será más estable y la diferencia de energía puede ser aprovechada, como en el caso de la fisión, para producir energía eléctrica.

LAS REACCIONES MÁGICAS

El proceso de fusión nuclear es el responsable de la producción de energía en las estrellas. Podríamos decir que ha sido la reproducción en el laboratorio, primero, y a escala comercial, después, de ese mecanismo estelar el *leitmotiv* de los que han dedicado esfuerzos a la investigación sobre este tipo de energía.

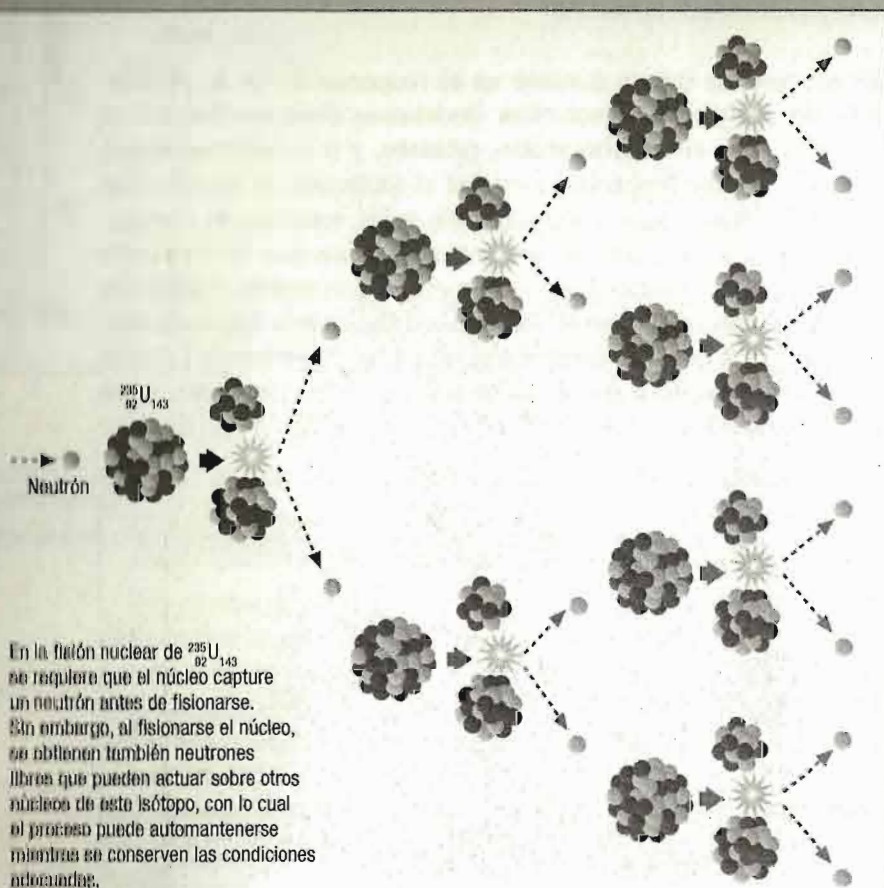
Para poder entender las características generales de la energía de fusión es necesario discutir, al menos brevemente, cuáles son las reacciones nucleares en las que podría basarse. Las más relevantes para lo que nos interesa son las que se muestran en la tabla, que, como vemos, responden a un núcleo de $^2_1\text{H}_1$ incidente sobre un segundo núcleo, que puede ser otro $^2_1\text{H}_1$, un $^3_1\text{H}_2$ o un $^3_2\text{He}_1$.

Reacción	Q (MeV)
$^2_1\text{H}_1 + ^2_1\text{H}_1 \rightarrow ^3_2\text{He}_1 + n$	3,3
$^2_1\text{H}_1 + ^2_1\text{H}_1 \rightarrow ^3_1\text{H}_2 + p$	4,0
$^2_1\text{H}_1 + ^3_1\text{H}_2 \rightarrow ^4_2\text{He}_2 + n$	17,6
$^2_1\text{H}_1 + ^3_2\text{He}_1 \rightarrow ^4_2\text{He}_2 + p$	18,3

Reacciones de fusión básicas. Aquí, las letras p y n simbolizan un protón y un neutrón, respectivamente. Se indica el valor Q de cada una de ellas en megaelectronvoltios (MeV). Una energía de 1 electronvoltio (eV) es la que alcanzaría un electrón que se moviera de un electrodo a otro si entre ambos existiera una diferencia de potencial de 1 V. Por otra parte, 1 MeV es igual a 10^6 eV.

ENERGÍA NUCLEAR DE FISIÓN

La fisión nuclear ocurre cuando núcleos con un número de nucleones de alrededor de doscientos o más se dividen en dos núcleos más ligeros, emitiéndose además neutrones, partículas beta y fotones. La energía de enlace por nucleón nos indica que esos núcleos que surgen tras la reacción son más estables que el núcleo pesado que se fisiona y, como consecuencia, se libera energía que se reparte en forma de energía cinética de los productos de la fisión. Pero el proceso no es simple, ya que para que esos dos fragmentos se separen tienen que superar la *barrera de repulsión coulombiana* existente entre ambos debido a que están cargados positivamente. Esa repulsión es la misma que se opondría a que ambos núcleos se fusionasen si



fuesen lanzados uno contra el otro desde una cierta distancia. En algunos casos, la probabilidad de atravesar esa barrera por *efecto túnel* es relativamente grande y el proceso de fisión compete con otros tipos de desintegración radiactiva, como la emisión alfa o beta. Pero en otros casos es necesario aportar la energía necesaria para que el proceso tenga lugar con una probabilidad apreciable. Ese es el caso de núcleos como el $^{238}_{92}\text{U}_{146}$, el $^{238}_{92}\text{U}_{143}$ (véase la figura), el $^{239}_{94}\text{Pu}_{145}$ o el $^{240}_{94}\text{Pu}_{145}$, que requieren capturar un neutrón antes de fisionarse.

Materiales moderadores

La mayoría de los reactores nucleares de fisión hoy día en funcionamiento utilizan como combustible uranio natural enriquecido en $^{235}_{92}\text{U}_{143}$; este núcleo presenta una probabilidad de fisión muy alta cuando se bombardea con neutrones *térmicos*, es decir, con neutrones de muy baja energía, pero su presencia en el uranio natural alcanza solo un 0,72 % y es necesario incrementarla para que la eficiencia del proceso sea suficiente para mantener la producción de energía. Como los neutrones útiles son de baja energía, los que se producen en la reacción de fisión, cuyas energías son del orden del MeV, deben ser *moderados*, o sea, deben reducir su energía para que puedan producir nuevas fisiones. Para ello se usa en los reactores un *moderador*, que es un material compuesto por elementos de bajo número atómico, como agua, agua pesada o grafito.



Central nuclear de Watts Bar en Tennessee, Estados Unidos.

Una primera inspección de esas reacciones nos indicaría que la óptima sería aquella con un Q más alto. Sin embargo, hay otros factores que juegan un papel fundamental para garantizar la viabilidad de la reacción. El primero de ellos es que, como ya dijimos

Cuando levantamos la vista de noche y vemos las estrellas, todo lo que observamos está brillando debido a una distante fusión nuclear.

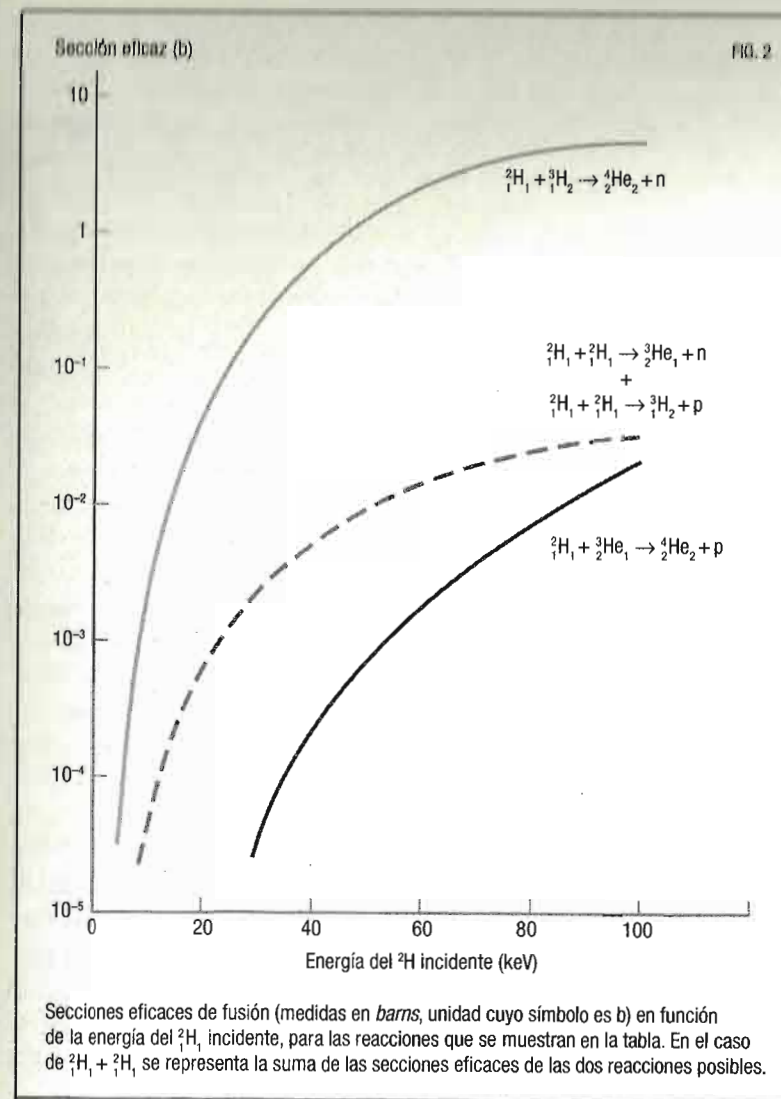
CARL SAGAN

antes, la fusión solo puede llevarse a cabo si los dos núcleos superan la repulsión electrostática existente entre ambos. En las tres primeras reacciones esa repulsión es la misma, ya que tanto el ${}^2_1\text{H}_1$ como el ${}^3_1\text{H}_2$, ambos isótopos del hidrógeno, tienen igual carga. Sin embargo, en la cuarta reacción la barrera de repulsión es el doble de alta, ya que la carga del ${}^3_2\text{He}_1$ es el doble que la del hidrógeno.

Pero además, y una vez superada la repulsión entre los núcleos, hay que tener en cuenta la *sección eficaz*. Esta es una medida de la probabilidad de que la reacción ocurra. En el caso de las reacciones de la tabla de la pág. 23, las secciones eficaces, en función de la energía del ${}^2_1\text{H}_1$ incidente, son las que se muestran en la figura 2. Como puede verse, la correspondiente a ${}^2_1\text{H}_1 + {}^3_1\text{H}_2$ es, para cualquier energía incidente dentro del rango representado, dos órdenes de magnitud mayor, al menos, que las de las otras reacciones.

Si la fusión se pudiera llevar a cabo acelerando ${}^2_1\text{H}_1$ en un haz que se hiciera colisionar contra el otro núcleo, que haría entonces las veces de blanco, podríamos definir con bastante precisión su energía, y las secciones eficaces mostradas en la figura 2 nos darían idea directa de las probabilidades de interés. Sin embargo, en este tipo de experimentos se podrían alcanzar corrientes incidentes que están muy por debajo de las que serían necesarias para que el dispositivo así construido pudiera dar lugar a una tasa de reacciones y, por tanto, a una producción neta de energía útil desde un punto de vista comercial.

Para resolver este problema, los procedimientos considerados hasta ahora se basan en confinar en un espacio limitado el combustible, que sería una mezcla de átomos con los dos tipos de núcleos requeridos, y aumentar su temperatura hasta que la barrera de repulsión electrostática fuera superada y con ello la reacción



pudiera producirse. En tal caso, la energía de esos núcleos no es única sino que responde a la que se conoce como *distribución de Maxwell-Boltzmann*, que se caracteriza porque, a medida que aumenta la temperatura, encontramos más y más partículas con

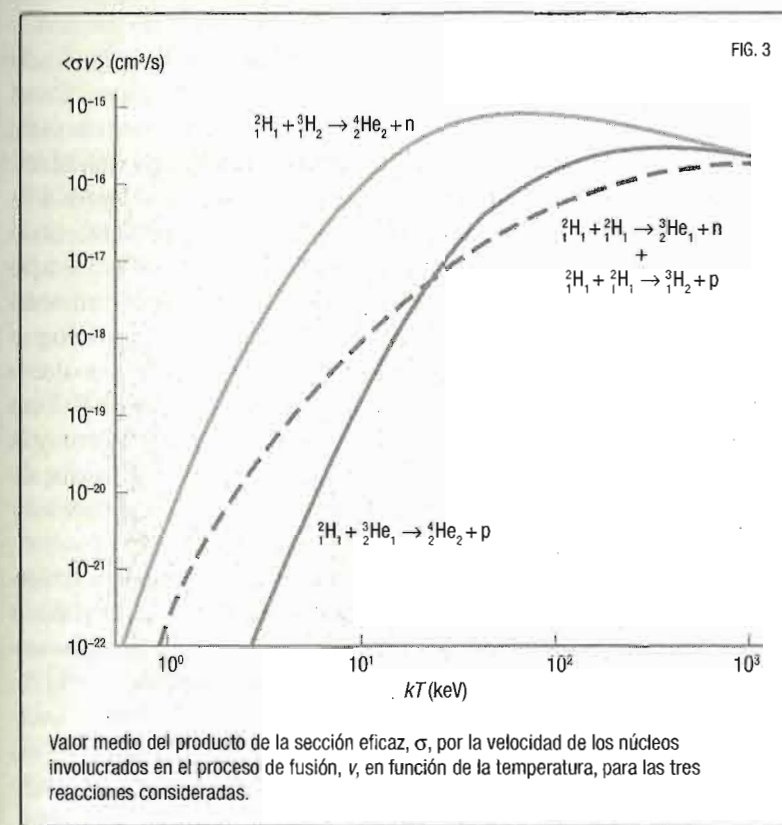
FUSIÓN EN LAS ESTRELLAS

El Sol, y en general todas las estrellas, constituyen reactores naturales de fusión en los que las correspondientes reacciones se mantienen a sí mismas. El primero en identificar estos procesos fue Hans A. Bethe, premio Nobel de Física en 1967. En 1938, asistió a la Cuarta Conferencia de Física Teórica «Energía estelar y procesos nucleares» que se celebró en Washington y que el físico George A. Gamow había organizado como un encuentro interdisciplinar entre astrofísicos y físicos nucleares. A sugerencia de Charles L. Critchfield, entonces estudiante de doctorado de Edward Teller, compañero de Gamow en la Universidad George Washington, Bethe estudió el proceso ${}^1_1\text{H} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^2_1\text{H} + e^+ + \nu$ en el que dos protones (dos núcleos de hidrógeno) se fusionan para formar un núcleo de deuterio, y que es la reacción inicial del denominado *ciclo p-p*. Poco después, Bethe encontró un segundo ciclo, denominado C-N-O, en el que carbono, nitrógeno y oxígeno juegan el papel de catalizadores. En ambos ciclos, que incluyen varias reacciones encadenadas, se produce ${}^4_2\text{He}$ y se libera energía. El brillo de las estrellas, entre otras de sus propiedades, depende de que predomine uno u otro, lo que está en función de cuál sea la masa total de las mismas. Así, el ciclo p-p es el que domina en las estrellas con masa igual o menor que la del Sol, que son menos brillantes que estrellas más masivas, como por ejemplo Sirio, en las que el ciclo C-N-O es el principal responsable de la producción energética.



Las estrellas en activo son reactores naturales de fusión nuclear que se mantienen en marcha mediante reacciones autosostenidas.

mayor velocidad y, por tanto, con energías más altas. Esto hace que, en realidad, para conocer la verdadera tasa de reacción sea necesario calcular el valor medio del producto de la sección eficaz por la velocidad, $\langle \sigma v \rangle$, teniendo en cuenta la distribución de esta última antes mencionada. En el caso que nos ocupa se obtienen los resultados que se muestran en la figura 3. Como vemos, para valores de kT altos, las tres reacciones consideradas tendrían tasas de reacción parecidas, pero para las temperaturas que se podrían alcanzar en los dispositivos susceptibles de ser construidos aquí en la Tierra (entre 1 y 10 keV, lo que equivale a una temperatura de 10^7 - 10^8 K), la reacción ${}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + n$ sigue siendo la dominante.



LÁSERES...

Esto no es, sin embargo, todo. Además de calentar el combustible a la temperatura adecuada hay que mantenerlo confinado de manera que su densidad sea lo bastante alta durante el tiempo necesario para conseguir que la tasa de reacciones de fusión controladas nos permita extraer energía en cantidad suficiente para que el procedimiento sea útil. Pero esto acarrea nuevos problemas porque es fundamental que el combustible esté «aislado» del contenedor en el que se encuentra: si no fuera así, su temperatura disminuiría, con la consiguiente reducción de la tasa de reacción, cuando ambos entraran en contacto y, además, el propio contenedor podría llegar a fundirse, dadas las temperaturas puestas en juego.

Para cumplimentar este nuevo requerimiento se han diseñado dos estrategias: el *confinamiento inercial* y el *magnético*. En el primero se utilizan haces de partículas o láseres de potencia para bombardear una pequeña esfera llena de combustible desde varias direcciones simultáneamente, de forma que se calienta a la vez que se comprime, alcanzándose tanto la temperatura como la densidad necesarias para producir la fusión durante el tiempo requerido para que el proceso sea eficiente. El procedimiento puede llevarse a cabo de dos maneras distintas. En el «enfoque directo» los láseres inciden directamente sobre la esfera de combustible. En el indirecto, la esfera se sitúa en el interior de una cámara, denominada *hohlraum*, que es la que absorbe la energía proporcionada por los láseres y la vuelve a emitir en forma de rayos X y de manera isótropa, favoreciendo un calentamiento y compresión simétricos de la esfera de combustible.

En el Laboratorio Nacional Lawrence Livermore (de Livermore, Estados Unidos) se han venido desarrollando sucesivos proyectos desde que, a principios de la década de 1950, se planteó la idea inicial. De entre ellos cabe destacar a Shiva (1977-1984), Nova (1984-1999) y NIF (por las siglas de *National Ignition Facility*), que fue inaugurado en 2009 y se prevé que siga en funcionamiento hasta 2030. Este último cuenta con 192 líneas de láser que pueden producir pulsos de hasta 500 MW de potencia.

En Europa cabe destacar el *Laser Mégajoule* (Burdeos, Francia), cuyas fases iniciales datan de 2002, y que fue puesto en marcha a finales de 2014. Similar al NIF, cuenta con 176 líneas de láser que pueden entregar una energía por encima de 1 MJ en un blanco con dimensiones del orden de los milímetros. La experiencia acumulada será fundamental para el proyecto HiPER, financiado por la Unión Europea y que se encuentra en la fase de diseño.

Otros láseres puestos en marcha en diversas partes del mundo constituyen los instrumentos fundamentales de programas de investigación que incluyen no solo la fusión sino, también, el estudio de propiedades fundamentales de la materia. Entre estos pueden mencionarse LLE OMEGA (Brighton, Estados Unidos), en funcionamiento desde 1995, o GEKKO XII (Osaka, Japón), puesto en marcha en 1983. China cuenta con el programa Shenguang («luz divina») que se inició en 1993, cuya tercera fase se completó en 2012 y que se encuentra hoy día en la fase 4. PALS (Praga, República Checa), en funcionamiento desde 2000, ISKRA (Sarov, Rusia), iniciado a partir de una sugerencia de Andréi D. Sájarov en 1962 y cuya fase 4 se completó en 1989, o Vulcan (Oxfordshire, Reino Unido), son otros ejemplos de este tipo de instalaciones.

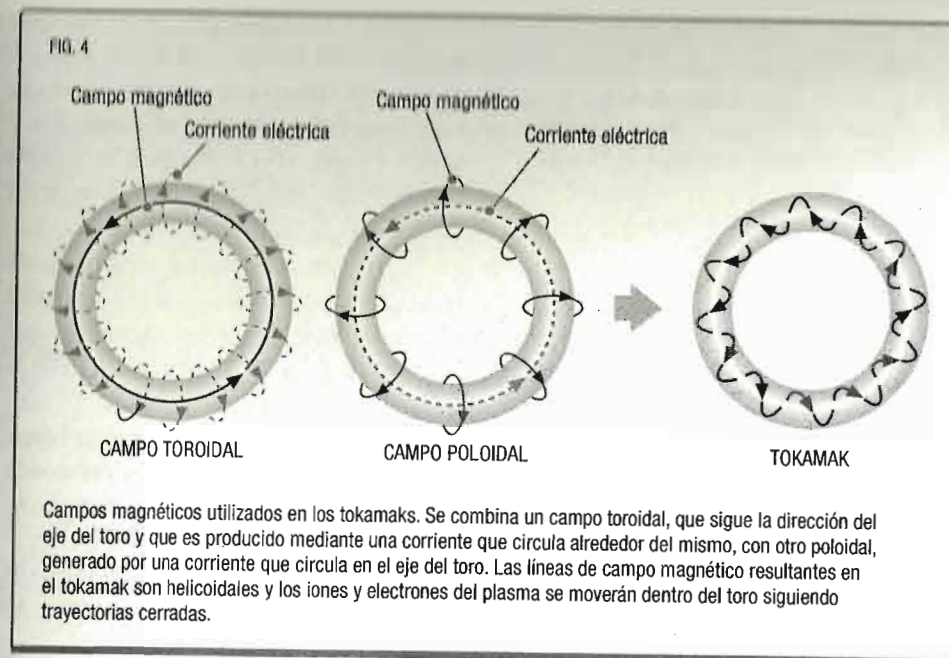
...Y TOROS

A pesar de los importantes avances logrados en el ámbito de la fusión por confinamiento inercial, los resultados obtenidos desde el punto de vista de la producción de energía no han sido aún lo satisfactorios que se podría esperar. Sin embargo, no ha ocurrido lo mismo con el denominado confinamiento magnético. A las temperaturas necesarias para la fusión, los átomos se encuentran ionizados, con iones positivos y electrones separados, en lo que se conoce como el cuarto estado de la materia, el plasma. En tales circunstancias, se puede sacar partido de una de las propiedades que las partículas cargadas presentan cuando se encuentran en movimiento en el seno de un cam-

po magnético: siguen trayectorias circulares con un radio que depende de su carga, de su masa y de la intensidad del campo magnético. Entonces, si se eligen adecuadamente los campos magnéticos aplicados es posible confinar los iones positivos y los electrones en una zona restringida del espacio que, como hemos visto antes, es el primer requerimiento para lograr la fusión.

Esta es la idea básica por la que se utilizan los dispositivos denominados *tokamaks* (tokamak es un acrónimo que deriva del nombre ruso del primer aparato de este tipo y que significa «cámara toroidal con bobinas magnéticas»). Los tokamaks fueron propuestos en 1950 por Ígor Y. Tamm y Sájarov a partir de una idea del también físico soviético Oleg A. Lauréntiev. Un tokamak es un toro, es decir, una superficie de revolución generada por una circunferencia que gira alrededor de un eje circular que no la corta; en palabras sencillas: un rosco vacío en su interior. Dentro del tokamak se dispone el combustible, que es calentado mediante diferentes mecanismos a la vez que se mantiene confinado magnéticamente.

La estrategia de confinamiento hace uso de los dos tipos de campo magnético que se muestran en la figura 4. El acoplamiento del *campo toroidal* con el *poloidal* fuerza a los iones positivos y a los electrones del plasma a seguir trayectorias helicoidales y, lo que es más importante, cerradas. La corriente que produce el campo poloidal es generada por un conjunto de arrollamientos externos que funcionan como el primario de un transformador en el que el propio plasma actúa como secundario. Además, esta corriente que conforma el campo poloidal da lugar a un primer nivel de calentamiento del plasma. Para alcanzar la temperatura requerida se utilizan técnicas de radiofrecuencia, en las que se transfiere energía a las partículas del plasma irradiándolas con microondas producidas en dispositivos externos al tokamak (como un girotrón o un *klystron*). O también se inyectan en el plasma haces de hidrógeno o deuterio previamente acelerados que, al ser neutros, no son desviados por los campos magnéticos e interactúan directamente con los iones y electrones del plasma cediéndoles su energía.



Sin embargo, esta situación introduce un nuevo inconveniente. Las partículas cargadas aceleradas emiten energía en forma de radiación, que se denomina *radiación de frenado* o *Bremsstrahlung*: las partículas del plasma están aceleradas, porque sobre ellas actúa una fuerza (la asociada con los campos magnéticos aplicados) que las hace seguir trayectorias que no son rectilíneas. En definitiva, para que el proceso produzca energía neta, la debida a la fusión debe ser mayor que la que se pierde por ese tipo de radiación. En la figura 5 se compara la potencia producida en cada una de las dos reacciones, ${}^2_1\text{H}_1 + {}^3_1\text{H}_2$ y ${}^2_1\text{H}_1 + {}^2_1\text{H}_1$, con la que se emitiría en forma de radiación de frenado. Como puede verse, por debajo de una cierta temperatura del plasma, la potencia emitida superaría a la producida por fusión y el proceso no sería posible. También vemos que la temperatura límite a partir de la cual la fusión produciría energía es mucho más baja en el caso de la reacción ${}^2_1\text{H}_1 + {}^3_1\text{H}_2$. No se muestra la curva correspondiente a la reacción ${}^2_1\text{H}_1 + {}^3_2\text{He}_1$.

PARTÍCULAS CARGADAS Y CAMPOS MAGNÉTICOS

Cuando una partícula cargada de masa m y carga q se mueve en el seno de un campo magnético constante de intensidad B , experimenta una fuerza de módulo $F = qvB \sin \alpha$, donde v es el módulo de su vector velocidad, B el del vector campo magnético y α es el ángulo que forman ambos vectores. La dirección de la fuerza es perpendicular a la velocidad v y a B y, por tanto, la trayectoria de la partícula es circular y está contenida en el plano perpendicular al campo magnético que contiene a v . El radio de curvatura de esa trayectoria es:

$$r = \frac{mv}{qB}$$

y la velocidad de la partícula no cambia de magnitud, sino solo de dirección. Esta propiedad se utiliza en muchas aplicaciones en física. Uno de los ejemplos más relevantes es el espectrógrafo de masas, un aparato que permite diferenciar los isótopos presentes en una muestra dada. Como se ve en la figura 1, una vez ionizados y acelerados, los isótopos que conforman el haz se hacen pasar por un campo magnético producido por un imán. En la región del campo cada uno describe una trayectoria circular con un radio que solo va a depender de su masa, ya que su carga y su velocidad serán iguales. Al atravesar la región del campo magnético, las trayectorias se separan y los iones más ligeros describen círculos más «cerrados» que los más pesados. Un detector sensible a la posición nos permite saber qué isótopos hay y en qué proporción se encuentran en la muestra inicial.

Partículas aceleradas

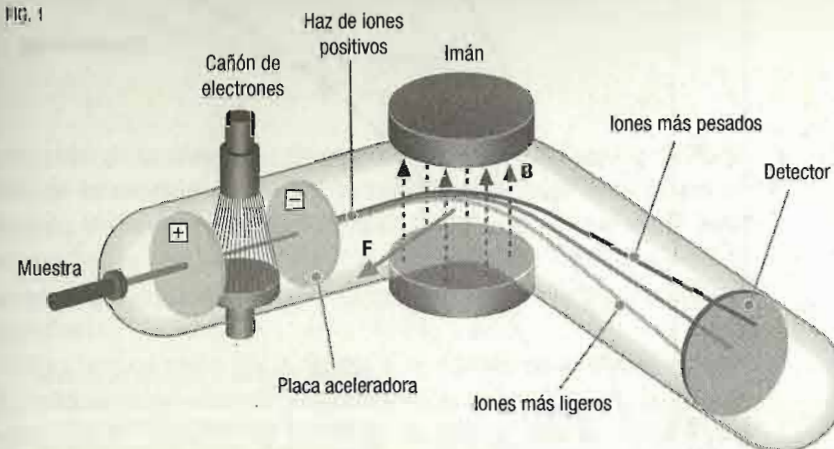
Otro campo de aplicación del comportamiento de las partículas cargadas al atravesar campos magnéticos es el de los aceleradores de partículas. Tanto en los *ciclotrones* como en los *sincrotrones* se usan campos magnéticos para mantener las partículas dentro de sus trayectorias de aceleración, así como para producir esa misma aceleración (en el caso del ciclotrón). Hoy día los sincrotrones se utilizan también para producir un tipo característico de radiación (la *radiación sincrotrón*), que tiene muchas aplicaciones en distintas ramas científicas. La idea es aprovechar otra propiedad de las partículas cargadas en movimiento: si sufren una aceleración producen radiación, la conocida como radiación de frenado o *Bremsstrahlung*, y una partícula que cambia la dirección de su velocidad (como ocurre con las que entran en un campo magnético) es una partícula acelerada, aunque no varíe el módulo de la misma. En los sincrotrones actuales se aceleran electrones que, una vez alcanzada la energía de interés, se hacen pasar por dispositivos denominados *onduladores* que incorporan combinaciones de campos magnéticos, y que hacen variar bruscamente su dirección de movimiento produciendo la radiación sincrotrón.

Campos separadores

También se utilizan los campos magnéticos en las instalaciones en las que se hacen colisionar haces de partículas con blancos de interés para estudiar posteriormente los productos de las reacciones que tienen lugar. Una vez aceleradas las partículas del haz, se extraen del acelerador y se llevan a la sala experimental en la que se encuentran el blanco y el sistema de detec-

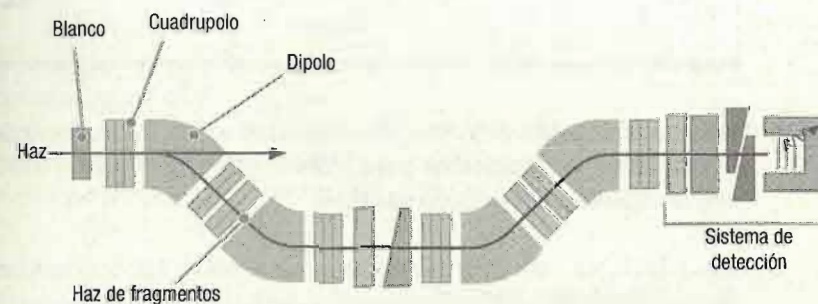
ción (figura 2). Para dirigir el haz hacia el blanco se usan distintas combinaciones de campos magnéticos que permiten desviar la dirección de desplazamiento de las partículas (mediante dipolos magnéticos), enfocarlas en la posición del blanco (con cuadrupolos) o reorientar el haz (mediante una combinación de varios cuadrupolos) y, tras la reacción, los campos magnéticos permiten analizar los productos de la misma separándolos antes de ser detectados.

FIG. 1

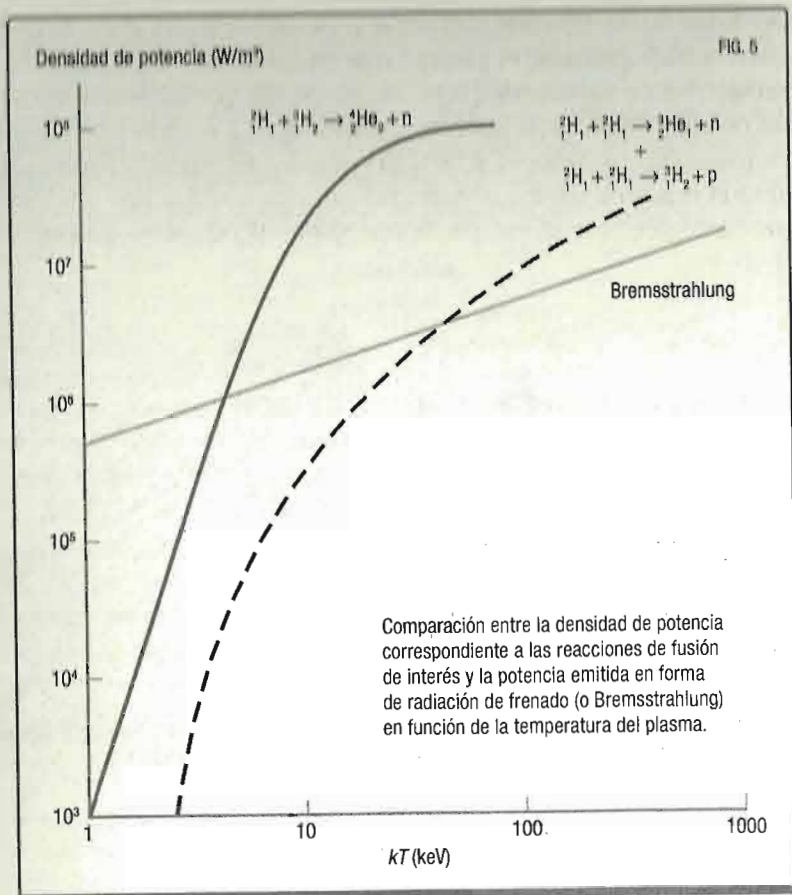


Esquema simplificado de un espectrógrafo de masas. Cuando las partículas atraviesan la región en la que actúa el campo magnético B , sufren una fuerza F que desvía sus trayectorias.

FIG. 2



Esquema simplificado del separador de fragmentos del GSI (Centro Helmholtz para la Investigación de Iones Pesados) en Darmstadt, Alemania.



porque la emisión de radiación de frenado crece con la carga de los núcleos involucrados y eso hace que esta última reacción sea completamente inadecuada.

EL CRITERIO DE LAWSON

Un reactor de fusión basado en el confinamiento magnético necesitaría por tanto, para alcanzar una ganancia neta de energía, que la producida en las reacciones de fusión compensara las

pérdidas de energía por radiación y, obviamente, también la necesaria para calentar el plasma a la temperatura requerida. Supongamos un plasma de ${}^2_1\text{H}_1 + {}^3_1\text{H}_2$, de forma que la densidad total de electrones es n . Si consideramos que la mezcla de ambos isótopos en el plasma es al 50%, la densidad de ambos elementos será la misma y valdrá $n/2$. En tal caso, la densidad de energía producida en las reacciones de fusión puede escribirse como

$$E_f = \frac{1}{4} n^2 \langle \sigma v \rangle Q \tau,$$

en función de la densidad de electrones, del valor medio del producto de la sección eficaz por la velocidad de los núcleos que se fusionan, de la energía producida en cada fusión (que en el caso que nos ocupa es $Q = 17,6$ MeV) y del tiempo τ durante el cual el plasma está confinado de manera que la reacción de fusión se pueda producir.

Como hemos visto en la figura 5, si consideramos una temperatura tal que $kT \sim 10$ keV, la producción de energía de fusión es mucho mayor (más de un orden de magnitud) que la pérdida por radiación que, por tanto, podemos despreciar. Pero la energía necesaria para calentar el plasma a la temperatura requerida T es de

$$\frac{3}{2} nkT$$

para los electrones y

$$\frac{3}{2} \frac{n}{2} kT$$

para cada uno de los dos tipos de iones, por lo que la energía térmica total requerida será $E_t = 3 nkT$. Es decir, que si somos capaces de calentar el plasma a temperatura T , suministrándole una energía E_p y lo mantenemos confinado durante un tiempo τ , el reactor nos proporcionaría una energía E_f . Para que haya ganancia será necesario que $E_f > E_t$ o, lo que es lo mismo, tendrá que verificarse que

$$n\tau > \frac{12kT}{\langle\sigma v\rangle Q}$$

Para la temperatura que estamos considerando esto implica que $n\tau > 10^{20}$ s/m³. Esta estimación del mínimo valor que ha de tener el producto de la densidad, n , por el tiempo de confinamiento, τ , se denomina *criterio de Lawson*. Un cálculo similar para el caso del plasma de ${}^2_1\text{H}_1 + {}^3_1\text{H}_1$ a una temperatura $kT \sim 100$ keV, requeriría $n\tau > 10^{23}$ s/m³, es decir, tendríamos que incrementar la densidad del plasma, el tiempo de confinamiento o el producto de ambos en un factor 100 para conseguir una producción neta de energía.

La importancia del criterio de Lawson estriba en que nos indica cuándo la reacción de fusión podrá mantenerse por sí misma, o sea, cuándo la energía producida en las fusiones que tienen lugar en el plasma sería suficiente para, sin aporte externo adicional de energía, mantener su temperatura de forma que las fusiones siguieran ocurriendo y la producción energética estuviera por encima de la pérdida de energía debida a los distintos mecanismos que enfrían el plasma. Este estadio del plasma se denomina *ignición* y constituye el objetivo a alcanzar en todo reactor de fusión. Es importante señalar que los productos de la reacción se reparten el total de energía producida en la fusión, 17,6 MeV (véase la tabla de la pág. 23), de forma que el ${}^4_2\text{He}_2$ adquiere una energía cinética de unos 3,5 MeV, mientras que el neutrón se lleva el resto, 14,1 MeV. Los núcleos de ${}^4_2\text{He}_2$, cargados positivamente, sentirán los campos magnéticos utilizados en la confinación del plasma e interactuarán con este, cediendo su energía e incrementando su temperatura. Los neutrones escaparán del campo magnético total, dado que no tienen carga, y deberán ser «detenidos» en un medio que, como consecuencia, se calentará y podrá emplearse en producir vapor y operar una turbina de generación de energía eléctrica.

El criterio de Lawson también es aplicable al confinamiento inercial. En este caso sería necesario mantener la densidad y la temperatura durante un tiempo mínimo antes de que la pequeña esfera estallara y se disgregaran los componentes del combustible contenido en ella. El tiempo que ese proceso requeriría sería del mismo orden que el que necesitarían las partículas de plasma

para escapar de la región de confinamiento. Para $kT \sim 10$ keV, la velocidad de las partículas es de unos 1000 km/s, y si la esfera se comprime por la acción de los láseres a una dimensión del orden de 1 mm, las partículas escaparán en un tiempo del orden de 10^{-9} s. En esas condiciones, la densidad de iones en el plasma debería ser del orden de 10^{20} m⁻³, muy superior a la densidad que el hidrógeno tiene cuando se encuentra en estado sólido o líquido. Además, para calentar una esfera de combustible de 1 mm de diámetro con esa densidad de iones a la temperatura requerida es necesario proporcionar una energía de 10^5 J, que en 10^{-9} s supone una potencia de 10^{14} W. Estos valores pueden considerarse como estimaciones mínimas, lo que explicaría que los dispositivos inerciales no hayan alcanzado hasta el momento las prestaciones que sí han conseguido los reactores experimentales basados en el confinamiento magnético.

PRECURSORES DEL ITER

La historia de la fusión nuclear comienza en 1919. El físico británico Francis W. Aston trabajaba entonces en el laboratorio Cavendish de Cambridge, como ayudante del insigne Joseph J. Thomson, y desarrolló un espectrógrafo de masas que le permitió identificar numerosos isótopos naturales de elementos estables (no radiactivos). Como un resultado de sus experimentos encontró que el átomo de helio cuyo núcleo era ${}^4_2\text{He}_2$ presentaba un «defecto de masa» al compararlo con la suma de la masa total de los cuatro átomos de hidrógeno que entonces pensaban que lo conformaban. Hay que recordar que en esa fecha aún no había sido descubierto el neutrón y se hacía uso de la regla del «número entero», que establecía que la masa de un isótopo cualquiera era un múltiplo entero de la del hidrógeno. Esta regla había sido propuesta por el propio Aston, quien obtuvo el premio Nobel de Química en 1922.

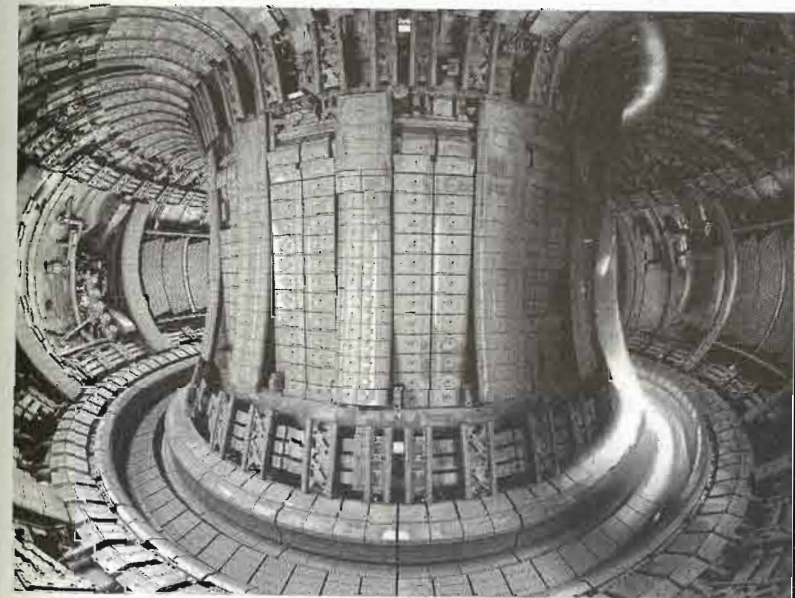
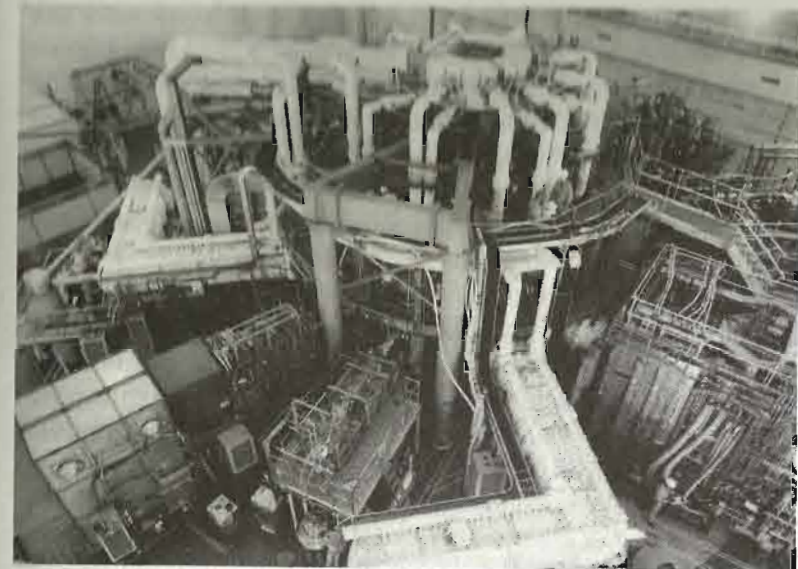
Este descubrimiento tuvo inmediato eco en Arthur S. Eddington, astrofísico inglés, quien en 1920 se percató de que ese defecto de energía le permitía dar cuenta de la edad del Sol: «Hay sufi-

ciente (energía) en el Sol para mantener su emisión de calor por 15 billones de años [...] Hay una pérdida de masa en la síntesis que alcanza alrededor de 1 parte en 120, ya que el peso atómico del hidrógeno es 1,008 y el del helio solo 4 [...] Si, inicialmente, un 5 por ciento de la masa de una estrella consiste en átomos de hidrógeno, que se van combinando gradualmente para formar elementos más complejos, el calor total liberado será más que suficiente para nuestras demandas y no tendríamos que buscar más la fuente de energía de las estrellas». Y añadió: «El hombre aprenderá un día a liberarla (esa energía) y a usarla para sus propios fines».

Pero tuvieron que pasar casi veinte años para que los primeros experimentos en los que se trató de confinar con campos magnéticos un plasma caliente se pusieran en marcha en Estados Unidos. Fue en 1946 cuando se licenció una de las primeras patentes en el campo: George P. Thomson, que como su padre Joseph J. Thomson, también obtuvo el premio Nobel de Física, en 1937, y Moses Blackman presentaron un dispositivo que ya incluía las características esenciales hoy día admitidas para un reactor de fusión.

Tras un periodo en el que toda la investigación que se llevó a cabo se consideró secreto militar, y con motivo de la celebración en Ginebra, del 1 al 13 de septiembre de 1958, de la conferencia «Átomos para la paz», se pusieron en común todos los avances realizados en los diferentes países que, a pesar de todo, eran similares, lo que facilitó de inmediato el intercambio de ideas y la colaboración entre equipos de investigación. Diez años después, los científicos del instituto Kurchátov, en la entonces Unión Soviética, anunciaron las extraordinarias prestaciones que habían conseguido con su tokamak T-3: habían alcanzado una temperatura de 10^7 K manteniendo el confinamiento durante un periodo superior a los 10 ms y estaban, por tanto, muy por encima de las condiciones conseguidas hasta entonces con cualquier otro dispositivo de fusión.

Lev A. Artsimóvich, el físico jefe del programa de fusión soviético, ante la incredulidad de sus colegas occidentales, invitó al físico británico Rendel Sebastian Pease, entonces director del Laboratorio de Física de Plasmas y Fusión Nuclear de Culham (Reino Unido), a que enviara un equipo para confirmar sus resultados.



Dos reactores experimentales de fusión. Arriba, vista exterior del TFTR (Reactor Tokamak para la Prueba de la Fusión), en servicio en Estados Unidos desde 1982 hasta 1997. Abajo, vista interior del JET (Toro Europeo Conjunto), empleado para experimentos desde 1983.

Unos meses más tarde la visita tuvo lugar y se pudo constatar que las condiciones que se habían indicado eran reales. Esto supuso un punto de inflexión en la investigación de la fusión que apuntó hacia la utilización de los tokamaks. Muchos países empezaron a desarrollar esta estrategia y las instalaciones proliferaron por todo el mundo. De todas ellas cabe destacar dos: el Toro Europeo Conjunto (JET) y el Reactor Tokamak para la Prueba de la Fusión (TFTR) (véanse las fotografías de la página anterior).

El TFTR fue construido en Princeton (Estados Unidos), estando en operación entre 1982 y 1997. Durante esos quince años, este reactor experimental dio lugar a varios hitos en la historia de la fusión. Así, a partir de diciembre de 1993 fue el primer dispositivo en utilizar un plasma de ${}^2_1\text{H}_1 + {}^3_1\text{H}_2$ al 50% y en 1994 produjo una potencia de fusión de 10,7 MW. En 1995 consiguió calentar el plasma a una temperatura récord: $5,1 \cdot 10^8$ K, un valor muy por encima del que existe en el centro del Sol. El desmantelamiento del TFTR dio paso al NSTX, el Experimento del Toro Esférico Nacional, que entró en funcionamiento en 1999 y que incorporó un nuevo diseño esférico para optimizar algunos de los parámetros cruciales, como la estabilidad del plasma que, además, puede ser confinado a presiones más altas que en los tokamaks convencionales. Estos diseños ya habían sido probados con éxito en Culham en el experimento START (1990-1998), que fue continuado por MAST (1999-2013) y sus evoluciones posteriores.

También en Culham está situado el JET, cuyos primeros experimentos con plasma datan de 1983 y que aún se encuentra en funcionamiento tras el acuerdo de la Unión Europea para extender su vida operativa hasta 2019. De entre los numerosos logros de esta instalación cabe destacar la producción de 16 MW de potencia de fusión en 1997, un 65% del total de 24 MW requeridos para situar el plasma en las condiciones necesarias para la ignición. En 2004 se realizaron mejoras para llevar la potencia de calentamiento disponible a 40 MW.

A partir de 2000, el programa experimental pasó a depender del Acuerdo Europeo para el Desarrollo de la Fusión, adoptado en 1999 por las instituciones que hacían investigación sobre fusión en Europa. Tras la firma del acuerdo del ITER, se creó

Fusión para la Energía, F4E, que es el organismo responsable de coordinar la contribución europea al proyecto internacional. Los objetivos del ITER han hecho que la actividad del JET se focalice en distintos aspectos relacionados con aquel y así se han probado sus configuraciones magnéticas, en 2006, y las paredes del dispositivo, en 2011.

Como hemos dicho anteriormente, la construcción de tokamaks se ha extendido por todo el mundo e iniciativas como JT-60 (Japón), Tore Supra (Francia), STOR-M (Canadá), T-15 (Rusia), FTU (Italia), ASDEX (Alemania), SST-1 (India), GLAST (Pakistán), ETE (Brasil), KSTAR (Corea del Sur), etc., han proporcionado información muy importante sobre los distintos aspectos que son relevantes para que la fusión nuclear sea una realidad. Y en ese camino, el ITER juega un papel tal vez definitivo.

Me gustaría que la fusión nuclear se convirtiera en una fuente energética viable. Nos proporcionaría un suministro inagotable de energía, sin contaminación o calentamiento global.

STEPHEN HAWKING

¿QUÉ SE ESPERA DEL ITER?

La construcción del ITER comenzó en 2010 y su objetivo principal es el de demostrar que es posible mantener la combustión del plasma de ${}^2_1\text{H}_1 + {}^3_1\text{H}_2$ durante periodos de tiempo suficientemente largos, por encima de unos 1000 s, en los que se le mantendrá a la temperatura adecuada gracias a la energía de las partículas generadas en la propia fusión, esencialmente los núcleos de ${}^4_2\text{He}_2$. Se trata pues del paso científico previo al desarrollo de un prototipo industrial de reactor de fusión nuclear.

La producción de energía de fusión está directamente relacionada con el número de reacciones de fusión ${}^2_1\text{H}_1 + {}^3_1\text{H}_2$ que se produzcan en el plasma. Por tanto, cuanto más volumen tenga el plasma confinado en el tokamak, mayor será *a priori* la capacidad de producción de energía del dispositivo. En el ITER se pretende alcanzar una producción de 500 MW de potencia de fusión a partir

de unos 50 MW de potencia de entrada, es decir, un retorno de un factor 10. Esto supone un incremento enorme sobre lo obtenido hasta ahora, cuyo máximo valor (0,65) se había logrado en el JET (16 MW de potencia de fusión producida, 24 MW de potencia de entrada). Para ello se ha diseñado un dispositivo que albergará un volumen de plasma de 840 m³ (en el JET ese volumen era de solo 100 m³) con lo que el peso total de la máquina será de más de 23000 toneladas. Además, el plasma habrá que calentarlo hasta los $5,1 \cdot 10^8$ K (unas 10 veces la temperatura del centro del Sol).

Y no solo eso, puesto que habrá que satisfacer el criterio de Lawson. Para conseguirlo se emplearán imanes superconductores (con un peso de más de 10000 toneladas) con los que será posible confinar y controlar el plasma en ignición. Todo se mantendrá en el interior de una vasija de vacío, fabricada de acero y con un peso de 8000 toneladas, que incorporará un recubrimiento de más de 400 módulos encargados de mantener protegidos de los neutrones de alta energía que se producen en la reacción de fusión a la propia vasija y los componentes externos del dispositivo. Con un sistema activo de enfriamiento podrá extraer una potencia térmica de más de 700 MW.

El ITER dispondrá además de un *divertor*, un sistema situado en el fondo de la vasija del tokamak, compuesto por 54 elementos de 10 toneladas cada uno que podrán manipularse vía control remoto y que permitirá extraer calor e impurezas generadas en el proceso de fusión, minimizando la contaminación del plasma.

La vasija y los imanes superconductores estarán rodeados por un criostato de 3800 toneladas de acero que proporcionará el enfriamiento necesario para estos (que deben funcionar a tan solo 4 K), conformando una cámara de vacío con una capacidad espectacular: 16000 m³.

En este dispositivo será posible estudiar el comportamiento del plasma en condiciones como las que cabe esperar ocurran en las plantas de producción de energía de fusión futuras. Entre otras cuestiones fundamentales, será posible analizar la estabilidad del plasma en plazos largos de tiempo. También será posible estudiar la viabilidad de las tecnologías disponibles para los distintos procedimientos que son requeridos en los procesos de calentamiento

del plasma, control y diagnóstico del mismo, enfriamiento de los imanes y mantenimiento remoto de todos los elementos.

Un aspecto esencial de todo el proceso es la producción de tritio, el isótopo del hidrógeno cuyo núcleo, el $^3_1\text{H}_2$, forma parte del combustible a utilizar. Este núcleo es inestable y se desintegra mediante *emisión beta* con un periodo de *semidesintegración* de 12,3 años. Por ello en la naturaleza solo existen trazas del mismo producidas en la interacción de los rayos cósmicos con los gases de la atmósfera y, sobre todo, originadas en las pruebas nucleares realizadas en la atmósfera desde que en 1945 se llevó a cabo la primera de ellas en Alamogordo, Estados Unidos. En el laboratorio se puede producir bombardeando blancos de litio, boro o nitrógeno con neutrones. En el ITER se podrán investigar los procedimientos óptimos para la producción de tritio dentro del propio plasma, facilitando el diseño de los recubrimientos adecuados para dicha producción en un entorno real de fusión.

Por último, el ITER permitirá demostrar que todo el proceso de producción es factible manteniendo bajo control el plasma en ignición sin que haya consecuencias medioambientales, un punto este que es fundamental si se quiere que la fusión nuclear constituya una fuente de energía realmente sostenible.

Aunque la entrada en operación con la consecución del primer plasma estaba inicialmente planificada para 2016, diversos imprevistos pospusieron esta fecha.

A pesar de las dificultades, en el ITER están fundadas muchas esperanzas para que la humanidad disponga de un suministro de energía con una larga perspectiva de sostenibilidad. El ITER es, como ya hemos indicado, un reactor experimental y la experiencia adquirida en su operación deberá asumirse en los proyectos que le sucedan. En este sentido ya se ha empezado a planificar DEMO, una central de demostración que debería producir entre 2 y 4 GW de potencia con un factor de retorno del orden de 25, y que sería el proyecto que abriría paso a las definitivas centrales comerciales basadas en la fusión nuclear. Esperemos por tanto que el ITER permita resolver los problemas básicos asociados al uso cotidiano de esta fuente de energía y que de una vez por todas dejen de quedar siempre cincuenta años para verla hecha realidad.

Las arrugas del espacio-tiempo

Einstein conjeturó la existencia de las ondas gravitatorias, movimientos ondulatorios del espacio-tiempo provocados por fenómenos catastróficos de gran envergadura ocurridos en el universo, bien en su origen o por colisiones de objetos celestes. LIGO ha podido detectar por vez primera esas arrugas de manera directa.

Cuentan que Albert Einstein tuvo la idea genial que le llevó con el paso del tiempo a formular la *teoría de la relatividad general* ocho años antes de que su famoso artículo viera la luz en 1915. Al parecer, un pintor se había caído desde el andamio en el que se encontraba trabajando y Einstein se acercó para ayudarlo. En la breve conversación que mantuvieron, el accidentado le relató cómo en la caída se había sentido ingrávito durante un instante fugaz y Einstein coligió lo que denominó *principio de equivalencia*, es decir, que los efectos de la gravedad se pueden simular mediante una aceleración adecuada. Por esa razón, si nos introducimos en una jaula que no tenga ventanas y en un momento nos vemos flotando en su interior, no podremos distinguir si esta se encuentra en el espacio exterior, a distancia suficiente de la Tierra para no sentir la atracción de la gravedad o, por el contrario, si un experimentador perverso la ha dejado caer desde un avión a 10000 m con el fin de llevar a cabo alguna medida particular.

A lo largo de 1915, Einstein publicó varios artículos sobre los fundamentos de la teoría de la relatividad general en la revista *Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaft-*

ten zu Berlin. En el último de ellos, titulado «Las ecuaciones de campo de la gravitación», mostraba las ecuaciones fundamentales de la relatividad de una forma tal que era posible utilizarlas para aplicaciones específicas. Einstein trataba de resolver dos problemas básicos que afectaban a la teoría de Newton. Por un lado, la ecuación de la gravitación universal, $F = GMm/r^2$, que especificaba la magnitud de la fuerza que un cuerpo de masa M ejerce sobre otro cuya masa sea m , no incluía el tiempo, y eso implicaba que el efecto de dicha fuerza era instantáneo, algo inadmisibles desde que la teoría de la *relatividad especial* había establecido la velocidad de la luz en el vacío como la máxima celeridad con la que una señal o un cuerpo podían desplazarse en el espacio. Por otro lado, la magnitud de la fuerza resultaba ser inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que separaba ambos cuerpos. Pero esto acarreaba otra dificultad, puesto que la propia teoría de la relatividad especial indicaba que las distancias eran dependientes del estado de movimiento del observador que las determinaba.

Einstein formuló su famosa ecuación,

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = -\frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu},$$

que relaciona la «métrica» $g_{\mu\nu}$ y las dos cantidades invariantes $R_{\mu\nu}$ y R , que se generan a partir de ella y que miden el grado de curvatura del *espacio-tiempo* en cada punto, con el contenido de masa y energía del mismo, representado por el tensor energía-momento, $T_{\mu\nu}$. En otras palabras, la presencia de masa y energía da lugar a un campo gravitatorio que se caracteriza por una determinada estructura geométrica del espacio-tiempo, la cual se obtiene a la luz de la ecuación. Establecida dicha estructura es posible calcular la trayectoria de cualquier cuerpo que se mueva en el campo gravitatorio mencionado, trayectoria que responde a una geodésica en el espacio-tiempo correspondiente. Tal y como gustaba decir al físico estadounidense John A. Wheeler: «La materia indica al espacio cómo debe curvarse y este dicta a

la materia cómo debe moverse». La fuerza gravitatoria dejaba de ser una interacción estándar entre dos cuerpos dotados de masa, como Newton la había vislumbrado, y pasaba a constituir la manifestación de la estructura geométrica del propio espacio-tiempo en el que los cuerpos involucrados se encuentran.

EL PERIHELIO DE MERCURIO

Unos años antes de publicar sus ecuaciones, Einstein se había enzarzado en una disputa científica con el matemático alemán David Hilbert, quien también estudiaba cómo formalizar la gravedad desde un punto de vista matemático. Por ello, Einstein aplicó su teoría inmediatamente a distintos problemas físicos concretos con el fin de, por un lado, eliminar cualquier posible duda acerca de la paternidad de la misma y, por otro, lograr que fuera aceptada por la comunidad científica sobre la base de pruebas experimentales que dieran cuenta de su validez.

La primera de esas pruebas vino de la mano de un problema planetario conocido desde antiguo: la precesión del *perihelio* de la órbita de Mercurio. Las órbitas de los planetas alrededor del Sol son casi elípticas. Si solo estuvieran presentes el planeta en cuestión y la estrella, la órbita sería exactamente elíptica, pero la presencia del resto de planetas produce perturbaciones que la modifican. El efecto que se observa consiste en que el perihelio de la órbita, es decir, el punto en el que el planeta se encuentra más cercano al Sol, se desplaza ligeramente en cada giro. Un ejemplo de la importancia de esas perturbaciones lo constituye el descubrimiento de Neptuno. En 1846, el matemático francés Urbain J.J. Le Verrier analizó los datos existentes acerca de la órbita de Urano y para explicarlos propuso la existencia del nuevo planeta, cuya posición determinó con exactitud y comunicó al astrónomo alemán Johann G. Galle, quien lo halló donde el primero había indicado.

El propio Le Verrier se percató, sin embargo, de que no era posible dar cuenta del desplazamiento del perihelio de Mercurio, en el marco de la mecánica newtoniana, si se consideraban los

planetas entonces conocidos y, en 1859, se aventuró a proponer la existencia de un nuevo planeta, bautizado con el nombre de Vulcano, o de un anillo de corpúsculos materiales, tanto uno como otros orbitando en una trayectoria más cercana al Sol que el propio Mercurio. A pesar de los numerosos intentos y de, incluso, algún falso avistamiento, nunca se tuvo noticia fehaciente ni de la existencia de Vulcano ni de la del anillo material, y el problema quedó sin resolver. Hubo que esperar hasta que Einstein encontrara la solución como una aplicación de su teoría de la relatividad general. En un artículo publicado en 1915 resolvió de forma aproximada las ecuaciones de campo y pudo explicar que era la presencia del Sol, como cuerpo masivo, la que introducía la perturbación adicional que era necesaria para explicar los datos experimentales. Ese mismo año, el físico alemán Karl Schwarzschild obtuvo las soluciones exactas de las ecuaciones en el caso de un cuerpo esférico sin rotación y pudo aplicarlas al problema de Mercurio, tal y como lo atestigua una carta que escribió a Einstein desde el frente ruso durante la Gran Guerra. Como él mismo comentaba más o menos jocosamente en esa carta, «la guerra me trata con suficiente amabilidad para permitirme [...] dar este paseo por la tierra de sus ideas».

AGUJEROS NEGROS

Schwarzschild falleció al año siguiente, víctima de pénfigo, una enfermedad autoinmune que desarrolló en las trincheras, pero aún tuvo tiempo de obtener otro resultado relevante. A partir de sus cálculos pudo comprobar que la teoría establecía que el tiempo medido por un observador, para un suceso dado, pasaba tanto más lentamente cuanto mayor era la intensidad del campo gravitatorio que afectaba al punto del espacio-tiempo en el que el evento ocurría o, por decirlo de otra forma, cuanto más cerca se encontraba ese punto del cuerpo masivo generador de la gravedad. Una de las consecuencias de este fenómeno era que la longitud de onda de la radiación característica que emiten los átomos, cuando sufren una transición de un estado excitado a otro de me-

nor energía, se veía modificada según el campo gravitatorio en el que se encontraran. Así, cuando un átomo en la superficie de una estrella masiva emitía rayos X característicos, un observador en la Tierra comprobaría que la longitud de onda de esa radiación que él era capaz de medir resultaba ser diferente de la que detectaría en nuestro planeta para un átomo del mismo elemento. Específicamente, lo que ocurría es que la radiación emitida desde la estrella y detectada en la Tierra tiene una frecuencia más pequeña. Algunas de estas radiaciones características son visibles y por ello se dice que la radiación ha sufrido un *desplazamiento hacia el rojo*, que es el color de la radiación visible de menor frecuencia. El propio Einstein había obtenido un resultado similar con su solución aproximada de las ecuaciones de campo.

Schwarzschild fue algo más lejos y determinó la densidad crítica de materia que debía de tener el cuerpo masivo para hacer que el tiempo se detuviera. Encontró así el denominado *radio de Schwarzschild*, que es el radio de una esfera tal que la velocidad de escape desde su superficie coincide con la velocidad de la luz. Evidentemente ese radio es diferente para cada valor de la masa, pero lo más importante es que Schwarzschild había descubierto lo que con el paso del tiempo se bautizó como *agujero negro*.

En un momento en el que la imagen que se tenía del universo era la de un sistema estático y que había existido desde tiempo indefinido, sugerencias como la de los agujeros negros eran consideradas como exóticas y el propio Einstein pensaba que esas situaciones singulares que Schwarzschild había descrito no podían existir realmente. Además, su característica esencial, que hace que no emitan ningún tipo de radiación, ni de partículas ni electromagnética, hacía de los agujeros negros objetos que, en caso de haberse formado en algún punto del universo, eludirían cualquier intento de detección directa. Sin embargo, como objetos muy masivos que son, no pueden evitar afectar al comportamiento de otros objetos celestes cercanos y, llegado el caso, pueden arrancar materia de los mismos, creando lo que se

El universo da lugar a la conciencia, y la conciencia otorga significado al universo.

JOHN A. WHEELER

RAYOS X CARACTERÍSTICOS

Los electrones atómicos están organizados en *capas* y *subcapas*. A cada capa le corresponde un valor dado del denominado *número cuántico principal*, n , que debe ser un entero positivo. Cada capa tiene una o varias subcapas que se distinguen mediante otro número cuántico; l , el número cuántico orbital. Los valores de l son enteros y solo pueden variar entre 0 y $n-1$. Los estados electrónicos están caracterizados por dos números cuánticos más. El primero, m , es entero y puede tomar valores entre $-l$ y $+l$. El segundo, m_s , está asociado con las posibles proyecciones del *espín* del electrón y puede valer $-1/2$ y $+1/2$. Estos números cuánticos permiten ordenar los electrones de un átomo y garantizar que se cumple un requerimiento fundamental: el *principio de exclusión de Pauli*. Los electrones son *fermiones*, su espín es $1/2$ y deben verificar ese principio que se puede formular diciendo que no puede haber dos electrones cuyos estados respectivos estén caracterizados por los mismos números cuánticos. Los estados electrónicos tienen asociada también una energía característica que depende del átomo concreto que se esté analizando. En otras palabras, dos estados, caracterizados por los mismos números cuánticos, pero de distintos átomos, tienen distintas energías.

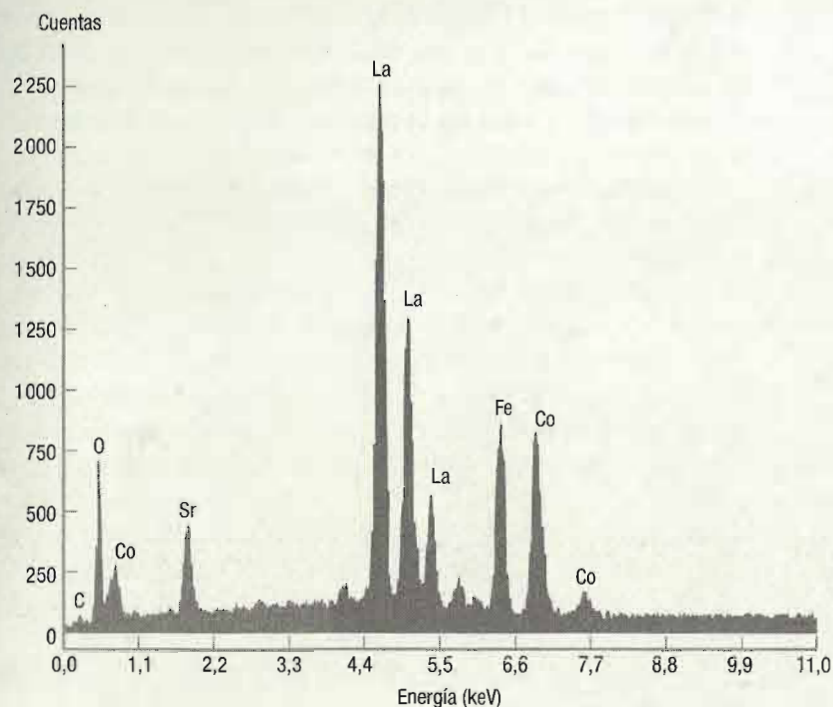
Señas de identidad

En determinadas situaciones, cuando una partícula interactúa con un átomo, este puede perder algún electrón. Por ejemplo, un fotón puede interactuar con un electrón atómico y arrancar-



Este espectrómetro de rayos X, que en la foto está siendo preparado para su instalación a bordo de una sonda espacial, es capaz de distinguir a distancia elementos químicos presentes en la superficie de un asteroide. Realiza su labor de detección a partir de la interacción del material superficial con rayos X provenientes del Sol.

lo de su átomo en un proceso conocido como *efecto fotoeléctrico*. Einstein fue el primero en describir correctamente este proceso y por ello obtuvo el premio Nobel en 1921. Una vez que el átomo ha sido ionizado, alguno de los electrones que están en estados con energía más alta que la del que ocupaba el electrón emitido, salta al estado desocupado y en ese proceso se emite radiación electromagnética de energía igual a la diferencia entre las energías de los dos estados involucrados en la transición. Como las energías de esos estados son características de cada átomo, también lo son las energías de esas radiaciones, que son conocidas por ello como *rayos X característicos* y constituyen las señas de identidad de los elementos presentes en el material bajo estudio. En el gráfico puede verse un ejemplo correspondiente a un compuesto de LaSrCoFeO .



Espectro de fluorescencia de rayos X de un compuesto de lantano, estroncio, cobalto, hierro y oxígeno (LaSrCoFeO). Cada pico corresponde a alguno de los elementos del compuesto.

conoce como *disco de acrecimiento* (o *disco de acreción*), que emite rayos X. Es precisamente a través de este tipo de efectos como se ha podido establecer su existencia.

El primer candidato a agujero negro, Cygnus X-1, en la constelación del Cisne, fue descubierto en 1964. Su disco de acrecimiento es una de las fuentes de rayos X más intensas observadas desde la Tierra y pudo detectarse mediante un detector situado a bordo de un cohete que había sido lanzado para evitar las capas atmosféricas que filtran las emisiones electromagnéticas procedentes del espacio exterior. Cygnus X-1 forma parte de un sistema binario que se completa con HDE 226868, una estrella variable supergigante, y que está situado a una distancia de algo más de 6000 años-luz. La estrella y el agujero negro orbitan una alrededor del otro separados por una distancia media de unos 30 millones de kilómetros, apenas un 20% del trecho que nos separa del Sol. Se estima que la masa de Cygnus X-1 es 15 veces la masa del Sol y que tiene un radio de Schwarzschild de algo más de 25 km. La emisión de rayos X, así como el movimiento orbital de la estrella compañera, permitieron obtener evidencias indirectas de la existencia del agujero negro.

Hoy día se asume que en el centro de la mayoría de las galaxias espirales y elípticas existe un agujero negro supermasivo con una masa comprendida entre los cientos de miles y los miles de millones de masas solares. La Vía Láctea (nuestra galaxia) no es una excepción y en su centro, en la frontera de las constelaciones de Sagitario y Escorpión, a unos 26000 años-luz, se encuentra Sagitario A*, una intensa fuente radioastronómica que sería el disco de acrecimiento de un agujero negro de unos 4 millones de masas solares y un radio de Schwarzschild de unos 12 millones de kilómetros. La observación de las trayectorias de varias estrellas próximas al agujero negro ha permitido establecer sus características.

El primero en observar emisiones de radio desde el centro de nuestra galaxia fue el radioastrónomo estadounidense Karl G. Jansky a principios de los años treinta del pasado siglo. Sin embargo, no fue hasta 1974 cuando los astrónomos estadounidenses Bruce Balick y Robert Brown descubrieron el objeto, que fue finalmente bautizado con su nombre actual en 1982 por

¿QUIÉN INVENTÓ EL NOMBRE DE «AGUJERO NEGRO»?

Existe una cierta controversia acerca de quién fue el que acuñó el término. Usualmente se acepta que el físico teórico estadounidense John A. Wheeler fue el primero en utilizarlo en una conferencia que impartió en Nueva York en 1967. Sin embargo, la divulgadora científica Marcia Bartusiak sostiene que «agujero negro» ya había sido usado en 1963 en una conferencia celebrada en Dallas, Estados Unidos: el editor científico de *Life*, Al Rosenfeld, que estuvo en ella, lo mencionó en su informe sobre la misma aparecido en el número de enero de 1964 de la revista. Rosenfeld estaba seguro de haber oído el término pero no recordó quién lo había utilizado. En la reunión de la Asociación Estadounidense para el Avance de la Ciencia, celebrada en Cleveland (Estados Unidos), también en enero de 1964, fue nuevamente usado y Ann Ewing, reportera de *Science News Letter*, lo esgrimió en el título (y en el texto) de un artículo suyo sobre ese encuentro científico, que fue publicado el día 18 de ese mes, es decir, seis días antes que el de Rosenfeld en *Life*. Nadie, sin embargo, fue capaz de identificar al inventor del vocablo. Incluso el propio Wheeler comentaba que en una conferencia anterior a la antes mencionada de Nueva York, un oyente, quizá cansado de oírle repetir una y otra vez «objeto colapsado gravitatoriamente por completo», le sugirió: «¿Por qué no llamarlo "agujero negro"?». Wheeler nunca se atribuyó la invención del término pero, en palabras de Bartusiak, «tenía la autoridad para dar el permiso de usarlo a la comunidad científica».



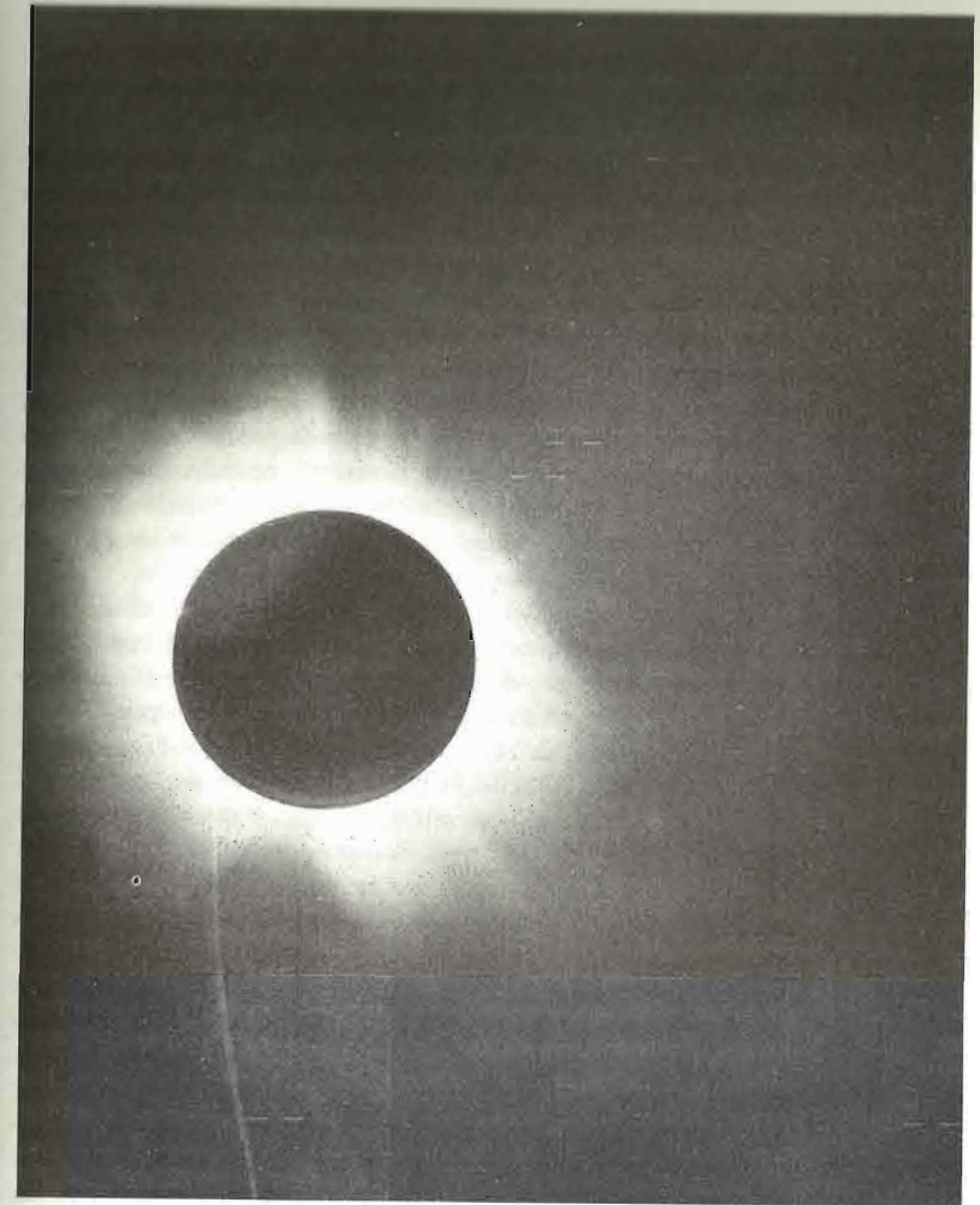
Ilustración de un agujero negro supermasivo, con un disco de materia girando a su alrededor y un chorro de rayos X disparado desde sus inmediaciones.

el propio Brown. Finalmente, en un trabajo publicado en 2009 en la revista *The Astrophysical Journal*, el equipo de Reinhard Genzel, un astrofísico alemán, presentó los resultados de las medidas realizadas durante dieciséis años de las órbitas alrededor de Sagitario A* de un total de 28 estrellas, incluida S2, que durante ese tiempo de estudio completó la suya propia. En palabras de Genzel: «Sin lugar a dudas, el aspecto más espectacular de nuestro estudio de dieciséis años es que ha proporcionado lo que ahora se considera como la mejor evidencia empírica de que los agujeros negros supermasivos existen realmente. Las órbitas estelares en el centro galáctico muestran que la concentración de masa central de 4 millones de masas solares debe ser un agujero negro, más allá de cualquier duda razonable».

EL ECLIPSE DE 1919

El 7 de noviembre de 1919, el periódico *The Times* publicó una noticia con el siguiente titular: «Revolución en la ciencia. Nueva teoría del universo. Las ideas newtonianas derrocadas». Y tres días más tarde, *The New York Times* anunciaba: «Luces colgando en el cielo. Hombres de ciencia más o menos excitados por los resultados de las observaciones del eclipse. La teoría de Einstein triunfa». Por su parte, el *Berliner Illustrirte Zeitung* ilustraba su portada del 14 de diciembre del mismo año con un retrato de Einstein y la siguiente leyenda: «Una nueva eminencia en la historia del mundo: Albert Einstein, cuyas investigaciones significan una completa revolución de nuestra comprensión de la naturaleza y cuyas ideas igualan en importancia a las de Copérnico, Kepler y Newton». Incluso el australiano *Western Argus* anunciaba el 20 de enero de 1920: «Revolución en la ciencia. Nueva teoría del universo».

No cabía duda de que la figura de Einstein había traspasado la frontera que separa la sociedad de la ciencia para no volver atrás, de manera que aún hoy día sigue siendo posiblemente el científico más conocido de todos los tiempos. Pero el origen de todo aquel terremoto periodístico estaba en un eclipse de Sol ocurrido en 1919.



Fotografía del eclipse solar del 29 de mayo de 1919 realizada por Arthur S. Eddington. El eclipse permitió llevar a cabo la primera demostración experimental de la teoría de la relatividad general.

Otra de las predicciones de la teoría de la relatividad general hacía referencia a las trayectorias de los rayos de luz en presencia de cuerpos masivos. Según la teoría, aquellas debían ser rectilíneas, pero como la presencia de la masa modificaba el espacio-tiempo, las trayectorias debían «adaptarse» a esas modificaciones, es decir, que en lugar de seguir caminos rectos, la luz describiría una de las curvas geodésicas asociadas a la nueva geometría. Einstein se percató de que la luz proveniente de una estrella cuya visual desde la Tierra fuera interrumpida por el Sol sufriría en su trayectoria un desvío que modificaría su posición aparente en el cielo. Bastaría pues comparar las fotografías de una región de interés cuando el Sol estuviera presente y cuando no para poder determinar la diferencia de posiciones aparentes y deducir si la predicción teórica era o no acertada. Obviamente, con el Sol presente sería imposible observar esas estrellas, pero un eclipse total de Sol cambiaba significativamente las circunstancias.

Los astrónomos británicos Frank W. Dyson y Arthur S. Eddington se percataron de la oportunidad que suponía el eclipse del 29 de mayo de 1919 y organizaron sendas expediciones con destino al ecuador terrestre, ya que el eclipse solo sería visible como total en una estrecha franja de terreno a su alrededor. Andrew C.D. Crommelin y Charles Davidson, ayudantes de Dyson en el Observatorio Real de Greenwich, establecieron su observatorio en Sobral, al noreste de Brasil. Por su parte, Eddington y Edwin T. Cottingham se dirigieron a la Isla del Príncipe, en el golfo de Guinea. El eclipse tuvo una duración de casi siete minutos y, a pesar de distintos problemas debidos a que el día resultó parcialmente nuboso en ambos puntos, los expedicionarios pudieron obtener numerosas fotografías para compararlas posteriormente con las que se tenían de la misma región celeste en ausencia del Sol (véase la fotografía de la página anterior). En abril de 1920 Dyson, Eddington y Davidson publicaron un extenso informe sobre los resultados obtenidos y las conclusiones no dejaban lugar a dudas: la luz sufría una deflexión debido a la presencia del Sol y la magnitud de la misma era del orden de lo que predecía la teoría de Einstein.

LAS ONDAS GRAVITATORIAS

Pero aún quedaba una predicción más de la teoría de la relatividad general por validar. En un artículo publicado en la revista *Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin* en 1916, titulado «Integración aproximada de las ecuaciones de campo de la gravitación», Einstein puso su atención en las ondas gravitatorias y analizó la pérdida de energía que un sistema material podría sufrir mediante la emisión de tales ondas. Concluyó, sin embargo, que su intensidad sería despreciablemente pequeña, del orden de una parte en 10^{27} . El último párrafo del artículo es bastante curioso: «No obstante, debido al movimiento de los electrones en el interior de los átomos, estos deberían radiar no solo energía electromagnética, sino también gravitatoria, aunque eso sí, en cantidades minúsculas. Como esto no ocurre en la naturaleza, parece que la teoría cuántica debería modificar no solo la electrodinámica de Maxwell, sino también la nueva teoría de la gravitación». Toda una declaración de intenciones.

Al igual que ocurría con los agujeros negros, Einstein no creía posible que las ondas gravitatorias pudieran ser observadas, pero no parece sensato pensar que no deban existir. Si la deformación del espacio-tiempo está provocada por la presencia de un objeto masivo en un punto del mismo, es razonable imaginar que algún tipo de modificación o movimiento de la masa de ese objeto daría lugar a una variación en las condiciones geométricas del espacio-tiempo acompañada con el cambio sufrido por el objeto. Una de las cuestiones relevantes es que, a diferencia de lo que establecía la teoría newtoniana, la información sobre un cambio de ese tipo no sería apreciada por un observador de manera instantánea, sino que entre el cambio y su detección pasaría un tiempo mínimo necesario para que esa información alcanzara al observador viajando a la velocidad de la luz, la máxima permitida para cualquier tipo de señal. Por poner un ejemplo simple: si por alguna razón el Sol desapareciera en un momento dado del sitio que ocupa en el cielo, en la Tierra seríamos conscientes de ello 8 minutos y 19 segundos más tarde, que es el tiempo que tarda la luz en viajar entre el Sol y nosotros. De igual manera,

EL FONDO DE RADIACIÓN DE MICROONDAS

A principios de 1965, dos radioastrónomos estadounidenses, Arno A. Penzias y Robert W. Wilson, se plantearon detectar las ondas de radio provenientes de la Vía Láctea utilizando la antena que la compañía Bell Telephone había instalado unos años atrás en Holmdel (Estados Unidos). Se trataba de una gran antena de aluminio de 15 m de longitud y una apertura de $8 \times 6 \text{ m}^2$, con forma de cuerno, que se había construido para el Proyecto Eco, en el que se trataba de enviar señales de radio de un punto a otro de nuestro planeta reflejándolas antes en grandes globos de plástico cubiertos de aluminio que se encontraban en órbita alrededor de la Tierra.

Una señal muy particular

El experimento no era simple, puesto que las ondas de radio detectadas de fuentes astronómicas son difíciles de distinguir del ruido producido en la antena por los electrones que se mueven aleatoriamente dentro de su propia estructura, del que se produce en el amplificador de la antena o del que proviene de la atmósfera terrestre. Tras descontar las distintas fuentes de ruido, Penzias y Wilson continuaron detectando una cantidad neta, no despreciable, de radiación para la longitud de onda de 7,35 cm, que era la que estaban midiendo. Además, la radiación observada era independiente de la dirección de medida, de la hora del día o de la estación del año. Descartaron que el origen de la radiación fuera nuestra galaxia porque, si ese fuera el caso, otras grandes galaxias cercanas también la emitirían y no había habido trazas de ello hasta ese momento. Y establecieron que su temperatura equivalente estaba entre 2,5 y 4,5 K.

Hallada la radiación fósil

Conversando con el radioastrónomo Bernard F. Burke, Penzias tuvo conocimiento de que Philip J.E. Peebles, físico teórico, había indicado en una charla que debería existir una radiación remanente con una temperatura equivalente del orden de unos 10 K, que provendría del enfriamiento, debido a la expansión del universo, de la enorme cantidad de radiación con temperatura equivalente muy elevada que debió existir en el universo primitivo. Peebles y sus colegas habían realizado los cálculos a sugerencia del físico experimental Robert H. Dicke, quien en aquel momento estaba llevando a cabo también otros experimentos para detectar una radiación fósil. Penzias habló entonces con Dicke y, después de la conversación, este les dijo a sus estudiantes, David T. Wilkinson y Peter G. Roll: «Chicos, se nos han adelantado». Tras una reunión de todos los involucrados, decidieron publicar dos breves artículos que aparecieron en el mismo número de *Astrophysical Journal*, uno detrás del otro, y en los que se agradecen mutuamente las discusiones llevadas a cabo. El primero, de carácter teórico, se titula «Radiación cósmica de cuerpo negro» y está firmado por Dicke, Peebles, Roll y Wilkinson. El segundo, donde se describe el experimento, está firmado por Penzias y Wilson y se titula «Una medida de un exceso de temperatura de antena a 4080 Mc/s». Penzias y Wilson fueron galardonados con el premio Nobel de Física en 1978 por su descubrimiento. El fondo de radiación cósmica se ha observado a distintas longitudes de onda y con diferentes detectores, tanto terrestres como espaciales. En la actualidad se acepta que su temperatura equivalente es de $2,725 \pm 0,001 \text{ K}$.



La famosa antena de Holmdel, hoy de interés histórico, con la cual en 1965 Arno Penzias y Robert Wilson detectaron el fondo de radiación de microondas. Su descubrimiento fue decisivo para que la teoría del Big Bang fuese aceptada ampliamente.

la distorsión del espacio-tiempo que tal evento provocaría daría lugar a una onda gravitatoria que tardaría el mismo tiempo en alcanzarnos.

Por otro lado, las ondas gravitatorias no interactúan con otros objetos masivos que puedan encontrar en su camino: tan solo viajan en el espacio-tiempo haciendo que se propaguen las «arrugas» originalmente generadas. Esto hace de estos eventos una fuente de información completamente diferente de las que hasta ahora se han utilizado para estudiar el universo, siendo incluso posible acceder a los instantes inmediatamente posteriores al Big Bang, cuando aquel no era transparente a la radiación electromagnética pero sí a la gravedad. Sin embargo, los desplazamientos espaciales que se pueden esperar en el caso de ondas intensas son del orden de 10^{-18} m, es decir, unas mil veces más pequeños que el tamaño de un protón. La pregunta en este punto es si, en contra de la opinión de Einstein, es posible detectar estas ínfimas modificaciones espaciales.

Para que se produzcan ondas gravitatorias es necesario que la variación de la masa que las origina presente algún tipo de asimetría. Por ejemplo, una explosión supernova en la que la materia expulsada lo sea de manera no simétrica producirá ondas. En cambio, no habría emisión de ondas gravitatorias en el caso de una estrella simétrica que estuviera girando, pero sí las habría si la estrella contara con alguna protuberancia o deformación. Se pueden así distinguir varios tipos de fuentes generadoras. Los sistemas de dos estrellas que orbitan una alrededor de la otra producen una onda *continua*, de frecuencia casi constante. Lo mismo sucede si los objetos son dos agujeros negros. Sin embargo, en la etapa final de uno de estos sistemas binarios, cuando se va reduciendo el radio de giro de las respectivas órbitas de los dos objetos, sus velocidades aumentan y la frecuencia de la onda gravitatoria que producen se va incrementando hasta que se alcanza la fusión de ambos. Se produce así una onda *inspiral*. Las ondas gravitatorias *de estallido* son las que están producidas por fuentes de corta duración, desconocidas o que no pueden predecirse. Las supernovas o los *estallidos de rayos gamma* son posibles eventos que generan este tipo de ondas. Por último, nos

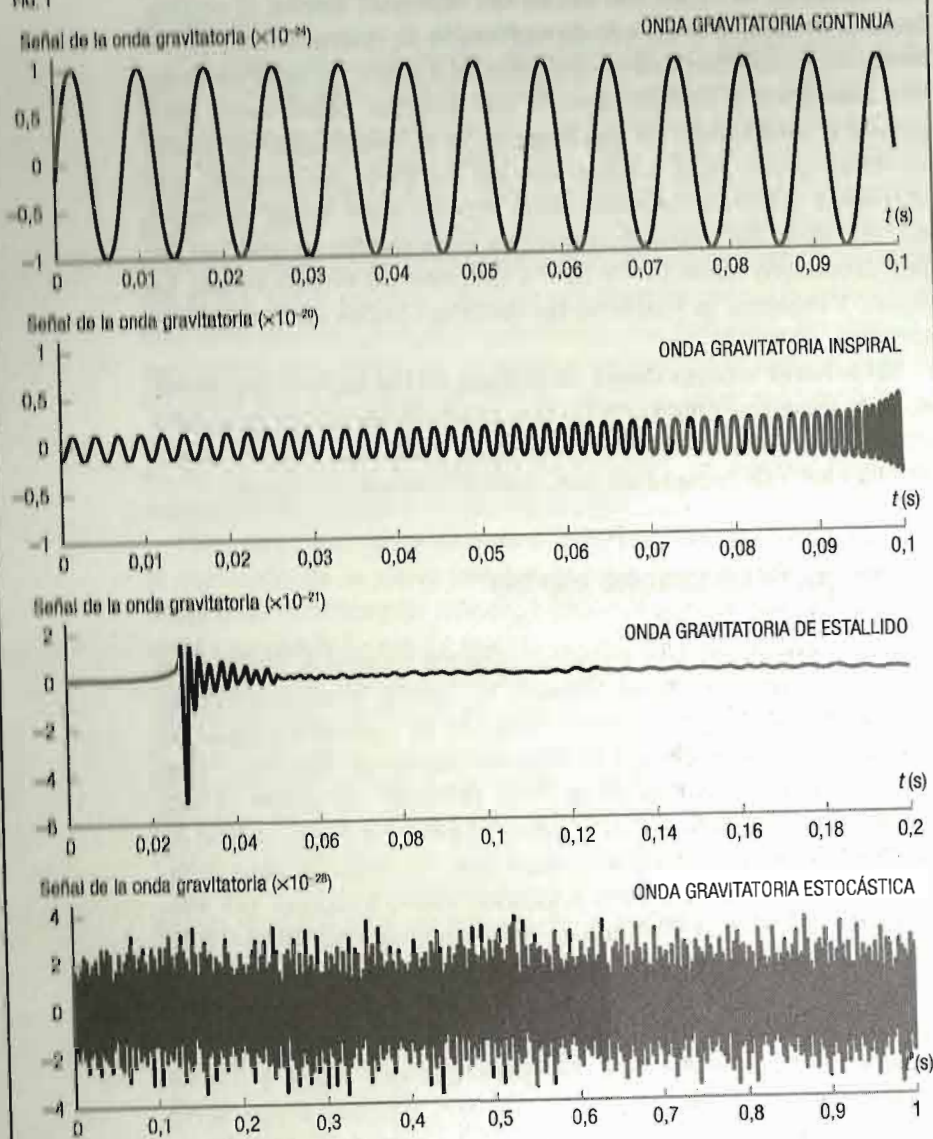
encontramos con las ondas gravitatorias *estocásticas*, que serían los restos de la evolución inicial del universo. Serían el equivalente gravitatorio del *fondo de radiación de microondas* y se habrían originado de manera cooperativa a partir de muchos eventos aleatorios e independientes que habrían contribuido para producir este fondo. El Big Bang sería el responsable primario de estas ondas, pero, a diferencia del fondo de microondas, que se habría generado pasados unos 300 000 años desde el origen del universo, las ondas gravitatorias estocásticas se podrían haber producido entre 10^{-36} y 10^{-32} s después del evento inicial. La figura 1 muestra la forma de las distintas ondas en función del tiempo.

En general, cuanto mayor es la masa de los objetos involucrados en el proceso catastrófico que produce las ondas gravitatorias, menor es la frecuencia de la onda generada. Por el contrario, cuanto más compactos son, mayor será esa frecuencia.

UN PÚLSAR EN UN SISTEMA BINARIO

En 1974, los astrofísicos estadounidenses Russell A. Hulse y su director de tesis doctoral, Joseph H. Taylor, descubrieron un nuevo tipo de objeto estelar. Usando el radiotelescopio de 305 m de diámetro situado en el observatorio de Arecibo (Puerto Rico), encontraron el púlsar PSR 1913+16. Un púlsar es una estrella de neutrones que rota sobre sí misma y emite pulsos de radiación electromagnética a intervalos extremadamente regulares, del orden de algunos segundos como máximo. Sin embargo, la cadencia de llegada de los pulsos de PSR 1913+16 no era todo lo regular que cabía esperar para este tipo de fuentes de radiación. De manera sistemática y con una periodicidad de casi 8 horas, los pulsos se adelantaban un poco o se retrasaban otro tanto. La única explicación plausible que Hulse y Taylor encontraron fue suponer que, en realidad, el púlsar descubierto formaba parte de un sistema binario de forma tal que el púlsar y su estrella compañera orbitaban alrededor del centro de masas de ambos. El análisis detallado del ritmo de los pulsos permi-

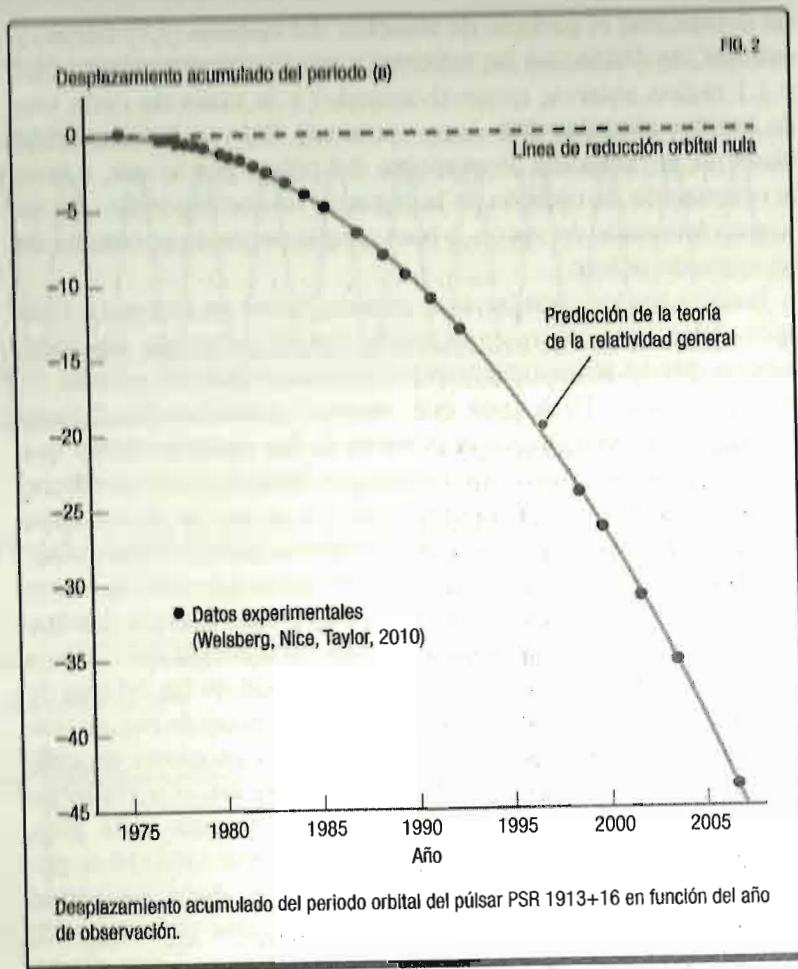
FIG. 1



Forma de las ondas gravitatorias típicas en función del tiempo en segundos.

tió determinar el periodo de rotación del sistema (7,75 horas) y estimar las distancias de máximo y mínimo acercamiento (4,3 y 1,1 radios solares, respectivamente) y la masa de cada una de las dos estrellas (1,4 masas solares). Solo se había podido observar la radiación proveniente del púlsar por lo que, o bien la orientación de emisión de la segunda no correspondía con un ángulo favorable de visión, o bien simplemente no se trataba de un segundo púlsar.

Hulse y Taylor recibieron el premio Nobel de Física en 1993 «por el descubrimiento de un nuevo tipo de púlsar, un descubrimiento que ha abierto nuevas posibilidades para el estudio de la gravitación». Pero ¿por qué «nuevas posibilidades»? Pues sencillamente porque era la primera de las oportunidades que se habían estado esperando desde que Einstein había predicho la existencia de ondas gravitatorias. De pronto se encontraba un sistema estelar paradigmático: dos estrellas masivas rotando una alrededor de la otra y, si todo funcionaba como la teoría de la relatividad general establecía, emitiendo energía gravitatoria en forma de ondas. Esa «pérdida» de energía del sistema binario se debía plasmar en una modificación de las órbitas de las dos estrellas. De hecho, ambas órbitas debían de ser, en realidad, espirales que irían confluyendo hacia un punto de colisión de los dos objetos. Además, si eso fuera así, el periodo orbital se debería ir reduciendo poco a poco con cada giro. Después de treinta años de seguimiento de PSR 1913+16 se pudieron acumular indicios que, sin sombra de duda, permitían validar la predicción teórica. Como puede verse en la figura 2, el desplazamiento acumulado en el periodo de rotación disminuye y los datos experimentales obtenidos por Joel M. Weisberg, David J. Nice y el propio Taylor coinciden perfectamente con el resultado de la predicción teórica. También están en perfecto acuerdo los valores medido y calculado para la precesión orbital que en este caso, dadas las características del sistema binario, alcanza un valor extremadamente grande: $4,2^\circ$ por año. El periodo orbital disminuye algo más de $75 \mu\text{s}$ por año y las dos estrellas de neutrones alcanzarán la coalescencia en unos 300 millones de años.



OBSERVATORIOS DE ONDAS GRAVITATORIAS

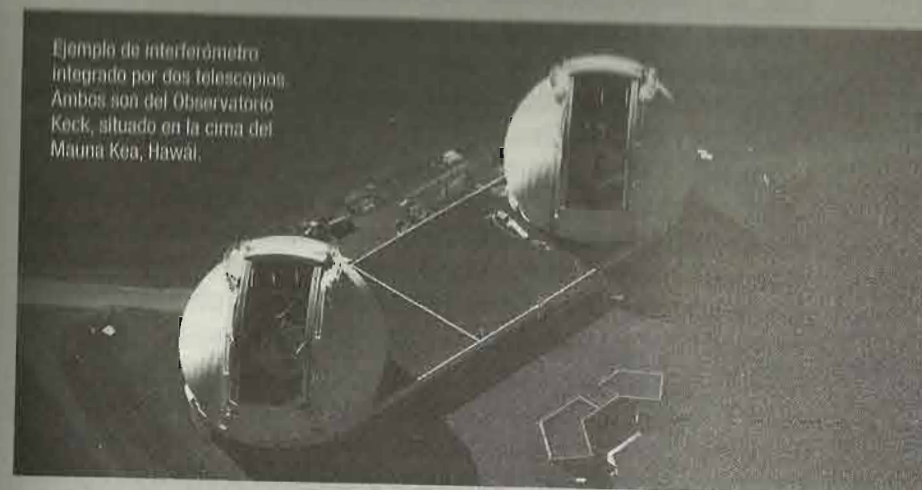
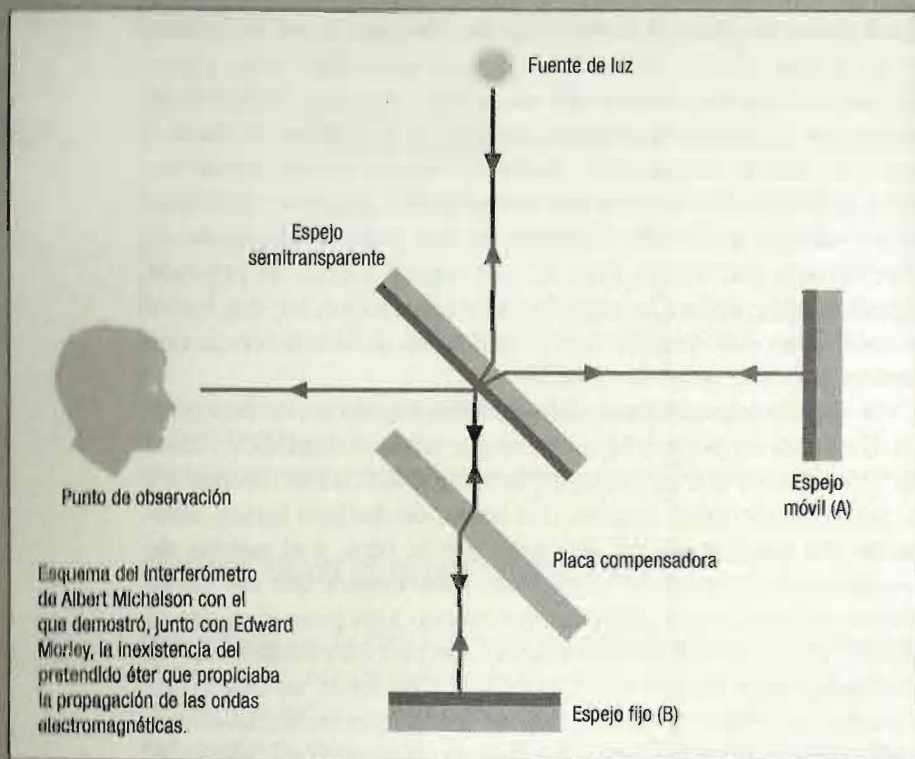
Los resultados de PSR 1913+16, meridianamente claros, proporcionan nada más (y nada menos) que un indicio indirecto de las ondas gravitatorias. No cabe duda de que sería importante tener, además, evidencias directas de su existencia. Pero ¿cómo podríamos detectar esas ínfimas señales? Y, lo que quizá es más

importante, ¿es posible hacerlo? Para responder a estas preguntas debemos primero entender qué efectos produce una de estas ondas cuando alcanza un cuerpo. Para ello imaginemos un conjunto de puntos materiales en reposo que se disponen sobre una superficie plana y supongamos que una onda gravitatoria incide perpendicularmente sobre dicha superficie. Los puntos materiales comenzarán a oscilar, separándose en una de las dos direcciones del plano y comprimiéndose en la dirección perpendicular, sin que se desplacen en la dirección de propagación de la onda. Lo mismo ocurrirá con un objeto material que sea alcanzado por una onda gravitatoria: no sufrirá cambio alguno en la dirección de propagación de la onda, pero se estirará en una de las direcciones transversales a ella y se comprimirá en la otra. Para detectar un efecto como ese hay un instrumento que parece diseñado *ex profeso*: el *interferómetro*. Se trata de un dispositivo en el que dos haces de luz se hacen coincidir en un punto de observación de manera que es posible estudiar la forma de las figuras de interferencia que se crean en el mismo. Si los dos haces de luz se han emitido desde la misma fuente, han recorrido la misma distancia y han atravesado espesores idénticos de los mismos materiales, llegarán en fase y darán un patrón de interferencia particular. Pero si, por alguna razón, se produce alguna modificación a lo largo de esas trayectorias, los dos haces se mezclarán con distinta fase y las figuras de interferencia nos podrán informar sobre lo ocurrido.

Un interferómetro construido de forma que los dos haces sigan trayectorias perpendiculares es por tanto el dispositivo ideal para el objetivo que se persigue: la onda gravitatoria modificará la distancia recorrida por los dos haces de distinta forma, alargando y/o comprimiendo una más que la otra, y el patrón de interferencia delatará su paso. Pero recordemos que las variaciones que se quieren detectar son mucho más pequeñas que el tamaño de un protón y eso conlleva extremar las condiciones de medición hasta límites insospechados. Con todo, se han construido en los últimos años varios de estos interferómetros que, a diferencia del usado en el célebre experimento de Albert A. Michelson y Edward W. Morley para detectar la existencia del

INTERFEROMETRÍA

La interferometría es una técnica que se utiliza en numerosos campos científicos y que se basa en mezclar la luz proveniente de dos o más fuentes diferentes. La idea básica es que cuando dos ondas luminosas se superponen se crean *figuras de interferencia* que responden al hecho de que ambas pueden llegar al punto de superposición en fase, en oposición de fase o en cualquiera de las situaciones intermedias. Del análisis de esas figuras se pueden deducir características de las propias ondas o de eventos que hayan ocurrido durante la realización de las medidas. Quizá el interferómetro más conocido es el que, en 1881, el físico estadounidense Albert A. Michelson diseñó para comprobar la existencia del éter lumínico, el medio material que a finales del siglo XIX se pensaba que era necesario para que pudiera producirse la propagación de las ondas electromagnéticas. Como vemos en la figura, consta de una fuente de luz que emite un rayo que choca contra un espejo semitransparente. Este espejo es tal que divide el rayo incidente en dos, uno que se transmite y que sigue en la misma dirección y otro que se refleja. Este último se lleva sobre un espejo (A) y tras reflejarse en él, vuelve a incidir en el espejo semitransparente y le sucede lo



mismo que antes; se divide en un rayo transmitido, que llevamos a un punto de observación, y otro reflejado que vuelve a la fuente. El rayo inicialmente transmitido se lleva a un segundo espejo (B), pero antes se le hace atravesar una placa compensadora que está hecha del mismo material que el espejo semitransparente y que permite asegurar que las distancias recorridas por los dos haces son iguales y que se han atravesado espesores iguales de los mismos materiales. Este haz se reflejará finalmente en el espejo semitransparente y llegará al punto de observación.

La figura de interferencia final

Cuando los dos rayos de luz se unen en el punto de observación se produce la figura de interferencia cuyas características están relacionadas con la distancia recorrida por los dos rayos que las producen y con la velocidad de la luz. Cualquier diferencia que se produzca en el recorrido de ambos rayos hará que no lleguen en fase al punto de observación y las interferencias sean diferentes a las esperadas. En particular, si se consigue que ambos rayos lleguen en oposición de fase, modificando, por ejemplo, la distancia recorrida por el primero de ellos sin más que variar la posición del espejo A la distancia adecuada, en el punto de observación no se verá luz alguna.

El éter no existe

Cuanto mayor es la distancia recorrida por ambos rayos, más precisión se tiene en el experimento y menores son las diferencias que, afectando al recorrido de ambos rayos, pueden discernirse. Por ello, en 1887, Michelson, en colaboración con el científico estadounidense Edward W. Morley, utilizó un interferómetro modificado en el que, básicamente, incrementaron la distancia recorrida por los dos rayos mediante unos juegos de espejos. La conclusión de los experimentos de Michelson y Morley fue que el éter lumínico no existía y que por tanto la velocidad de la luz era isótropa en lo relativo al movimiento de la Tierra.

der, no pueden disponerse en el banco óptico de un laboratorio estándar. Las primeras propuestas de este tipo de detectores datan de los primeros años de las décadas de 1960 y 1970, pero no fue hasta finales del siglo xx cuando finalmente se empezaron a construir varios de ellos.

En Japón, concretamente cerca de Tokio, estuvo en funcionamiento, hasta 2008, TAMA300, caracterizado por tener unos brazos de 300 m de longitud. El objetivo de este interferómetro era conseguir detectar ondas gravitatorias que pudieran producirse en el marco del Grupo Local de galaxias y desarrollar las técnicas avanzadas necesarias para un dispositivo mucho más ambicioso: KAGRA. Este es un interferómetro subterráneo situado en la mina Kamioka, a 200 m de profundidad bajo el monte Ikenoyama. En la misma mina se encuentran otros experimentos importantes, como el Super-K (SuperKamiokande). La razón de su construcción bajo tierra es minimizar el ruido proveniente de eventos sísmicos, una de las distintas perturbaciones que pueden afectar a las señales que pueden ser detectadas. Las perturbaciones sísmicas tienen amplitudes 100 veces más pequeñas en profundidad que en la superficie. La longitud de los brazos del interferómetro KAGRA es de 3 km, por lo que ha sido necesario excavar un túnel de más de 7 km que se acabó de construir en marzo de 2014. Se espera que KAGRA pueda entrar en funcionamiento en 2018.

En septiembre de 1995 se inició la construcción de GEO600, un interferómetro germano-británico con brazos de 600 m de longitud que se encuentra cerca de Hannover (Alemania). Los investigadores de esta instalación se han especializado en la mejora de las características de la luz láser utilizada para generar las interferencias. Así, por ejemplo, han conseguido incrementar su potencia hasta en un factor 10, mediante superposición de la luz consigo misma. Por otro lado han desarrollado un nuevo tipo de láser, denominado *láser de luz comprimida*. Ambas técnicas permiten que la sensibilidad del interferómetro mejore significativamente, alcanzando la de otros interferómetros con brazos de longitud mucho mayor.

Cerca de Pisa (Italia) se encuentra Virgo, un interferómetro con brazos de 3 km de longitud. Se trata de un proyecto conjunto

franco-italiano que se construyó entre 1996 y 2003. Estuvo operativo hasta 2011 y desde entonces se le ha sometido a una mejora que lo convertirá en un nuevo dispositivo, Virgo Avanzado, con una sensibilidad un orden de magnitud superior a la del original, un láser de 200 W de potencia y un nuevo sistema de espejos.

La colaboración LIGO, acrónimo de *Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory*, dispone de dos observatorios interferométricos situados en Hanford y en Livingston, en los estados de Washington y Luisiana, respectivamente. Se trata de un proyecto financiado por la Fundación Nacional para la Ciencia estadounidense, con contribuciones relevantes del Reino Unido, Alemania y Australia. Su construcción se inició a finales de 1994 y se concluyó en 1997. Desde su puesta en marcha ha sufrido dos mejoras importantes: LIGO Mejorado, que operó entre 2009 y 2010, y LIGO Avanzado, que comenzó sus observaciones en septiembre de 2015 y que ha sido diseñado para alcanzar una sensibilidad diez veces superior a la del dispositivo original. Las dos instalaciones interferométricas de LIGO tienen brazos de 4 km de longitud e incorporan los últimos avances técnicos desarrollados tanto en sus antecesores como en las otras instalaciones mundiales (véase la fotografía superior de la pág. 75).

Desde 2002, se han llevado a cabo campañas de medidas conjuntas de varias de esas instalaciones, lo que ha permitido establecer límites superiores al tipo y número de eventos de ondas gravitatorias que se espera que puedan ser detectadas. Además, la detección de esos eventos en varios observatorios interferométricos permitiría determinar con mejor precisión el origen del suceso mediante procedimientos de triangulación.

La extraordinariamente reducida intensidad de los efectos que se pretenden medir ha hecho necesario llevar el proceso de detección a límites extremos, minimizando numerosas fuentes de ruido que podrían ocultar las señales de interés. Ya hemos hablado antes de los efectos sísmicos que pueden reducirse sig-

Damas y caballeros: hemos detectado ondas gravitatorias. ¡Lo conseguimos!

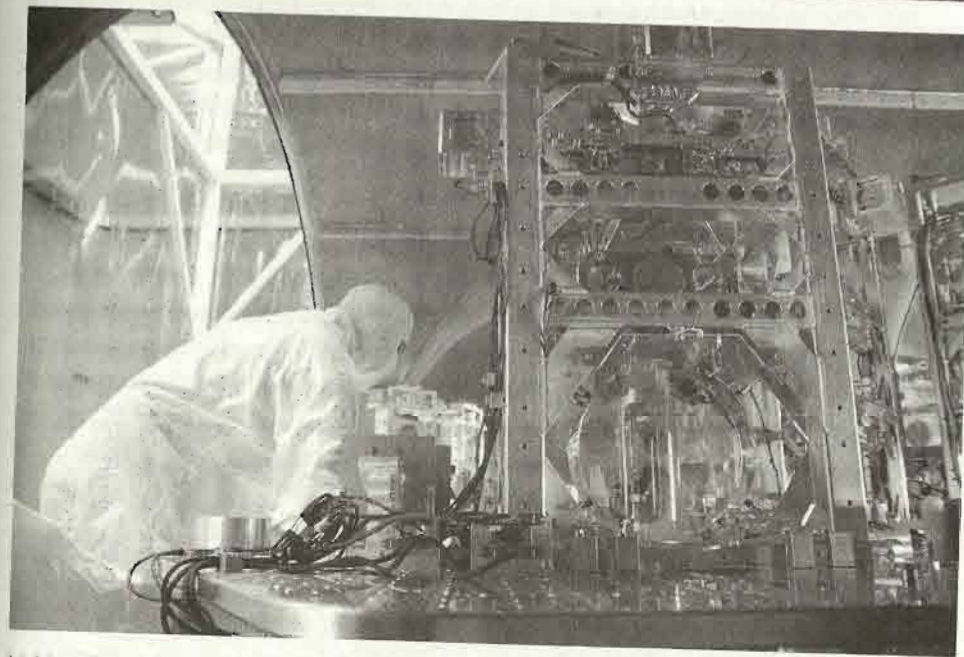
**DAVID REITZE, DIRECTOR EJECUTIVO
DEL EXPERIMENTO LIGO**

nificativamente situando el interferómetro bajo tierra, como es el caso del KAGRA. En las restantes instalaciones, que son superficiales, la reducción de esas perturbaciones se lleva a cabo mediante una disposición compleja de los espejos encargados de reflejar los haces de luz. Estos tienen forma cilíndrica, con unas decenas de centímetros de diámetro y de espesor, y se encuentran suspendidos en estructuras que, por ejemplo, en el caso del tipo utilizado en Virgo, consta esencialmente de varios péndulos en cadena. Si la frecuencia del ruido que se pretende eliminar es mayor que la frecuencia de resonancia propia de los péndulos, estos mismos aíslan el espejo de las vibraciones que se presentan en el plano horizontal. Un péndulo invertido en la parte superior de la estructura, en este caso, o combinaciones adecuadas de muelles, en otros, permiten mitigar las vibraciones verticales.

Los tubos que contienen los brazos del interferómetro, incluidos los espejos y el láser, se encuentran en alto vacío y a temperatura criogénica, por debajo de -250°C , para anular los movimientos de los espejos que pudieran inducir corrientes de aire formadas por diferencias de temperatura, reducir al mínimo los posibles efectos térmicos en los propios espejos y, también, evitar cualquier posible perturbación de la trayectoria de la luz debido a interacciones con moléculas de gas. En algunos casos, como en GEO600, la estructura que sustenta los espejos se asienta en un sistema activo de aislamiento sísmico que la mueve, llegado el caso, en sentido contrario al del movimiento del suelo, cancelando la perturbación.

Los espejos están fabricados con silicio fundido y están pulidos de forma tal que la absorción de luz es inferior al 0,002%. En algunos casos incorporan pequeños imanes que sirven para estabilizarlos, mediante bobinas de control, frente a cualesquiera otros tipos de vibraciones o desplazamientos.

Por último, en todos los interferómetros se hace que la luz láser se refleje varias veces entre los espejos que generan la cavidad resonante, incrementando así la longitud de la trayectoria recorrida por el haz luminoso, lo que se traduce en una mejora de la sensibilidad final del dispositivo.



La fotografía superior es una vista aérea del interferómetro LIGO en Livingston. Puede apreciarse la longitud de uno de sus brazos, que es de 4 km. Abajo, un técnico trabajando en la sensible óptica utilizada por el LIGO.

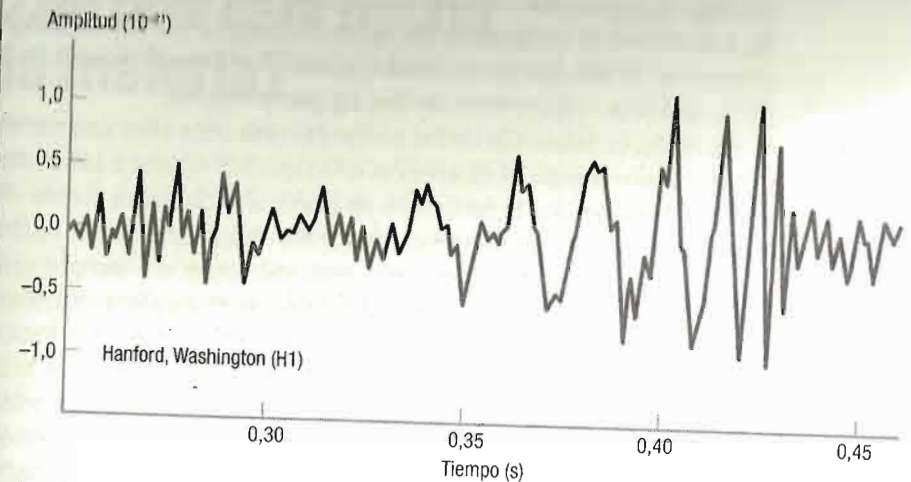
El 14 de septiembre de 2015, a las 9:50 UTC, los dos observatorios LIGO detectaron el evento GW150914, una señal de apenas 0,5 s de duración que causó una excitación inusual entre los científicos de la colaboración. Tras varias horas en las que, en un animado intercambio de mensajes entre ellos, trataron de verificar si era un nuevo test de control de los detectores, pudieron confirmar que, finalmente, habían «visto» la señal que llevaban esperando desde hacía varios años con toda la paciencia del mundo. Luego, la tarea del análisis de los datos obtenidos y su interpretación les llevó unos meses, pero sin duda cabe pensar que la euforia que embargaba a todos ellos les hizo enormemente difícil mantener el secreto hasta que tuvo lugar el anuncio oficial, ya entrado 2016.

La figura 3 muestra las señales observadas en el laboratorio de Hanford (H1), y la 4, las observadas en el de Livingston (L1). Como la onda gravitatoria viaja a la velocidad de la luz y ambos detectores están separados por unos 3000 km en línea recta, hay un desfase de unos milisegundos entre los instantes en los que la señal fue recibida por los dos observatorios. La diferencia de tiempo medida fue de 6,9 ms. En la figura 4 se muestra la señal H1 desplazada ese tiempo para «casarla» con la L1. Además, como la orientación de los dos observatorios es contraria, la señal H1 está invertida. Como vemos, ambas señales muestran un acuerdo excelente.

Una vez detectada, era importante analizar la señal y establecer su origen. Su patrón resultaba compatible con un proceso de coalescencia de dos masas dando lugar a una onda gravitatoria de tipo inspiral. El análisis de la frecuencia de la onda y de su variación temporal permitió verificar que los dos objetos debían haber estado orbitando a una distancia de tan solo 350 km. Por otro lado, las masas de ambos debían ser tales que solo podía tratarse de dos agujeros negros.

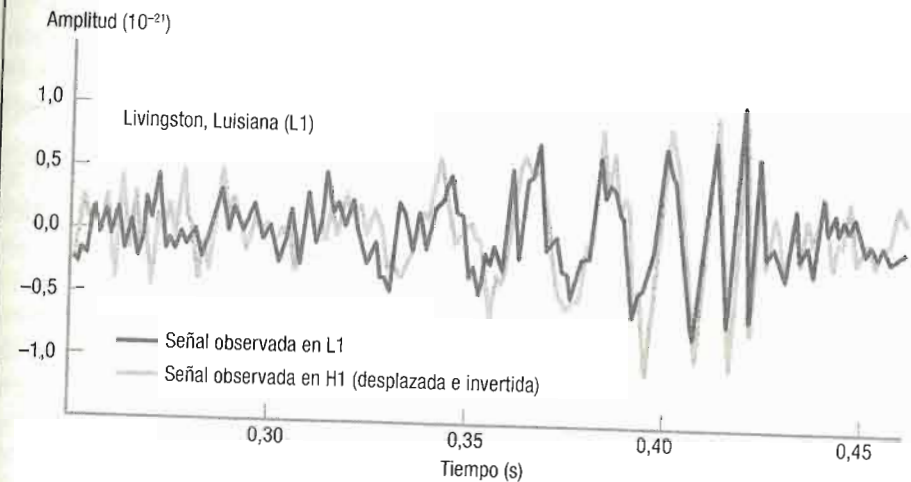
Estos resultados no dejaban lugar a dudas. Se había observado la fusión de dos agujeros negros con masas del orden de 36 y 29 masas solares. Tras la coalescencia, el agujero negro resultante adquirió una masa de 62 masas solares y una energía equivalente a 3 masas solares fue irradiada en forma de ondas gravitatorias.

FIG. 3



Amplitud de las ondas gravitatorias detectadas en uno de los dos laboratorios de la colaboración LIGO, el de Hanford.

FIG. 4



Amplitud de las ondas gravitatorias detectadas en el otro laboratorio de la colaboración LIGO, el de Livingston, junto con la señal medida en Hanford, desplazada 6,9 ms e invertida. La escala de tiempos está referida a las 9:50:45 UTC del 14 de septiembre de 2015.

Se estimó que el evento podría haber ocurrido a una distancia de 410 Mpc (megapársecs). Indirectamente, esta observación puso de manifiesto la existencia de agujeros negros de los tamaños indicados, de los que no se tenía constancia hasta el momento, y de un sistema coalescente de dos agujeros negros.

Sin duda, la detección de las ondas gravitatorias abre una nueva era en la astronomía. A diferencia de lo que les ocurre a las ondas electromagnéticas o la radiación de partículas, la única fuente de información sobre el universo disponible hasta ahora, las ondas gravitatorias no interactúan con la materia ni con los campos gravitatorios y el universo resulta prácticamente transparente a ellas. Esto significa que será posible observar objetos que de otra forma estarían ocultos a nuestros detectores y, también, aquellos procesos estelares que no produzcan luz o cualquier otra radiación electromagnética o que no emitan partícula alguna. En ese sentido es particularmente atractivo el hecho de que las ondas gravitatorias nos permitirían acceder incluso a los primeros instantes tras el Big Bang. Además, esas ondas serían observables tal y como fueron producidas, sin distorsiones de ningún tipo.

La disponibilidad de varios observatorios que permitan una detección simultánea dará además pistas fiables acerca de la posición de la fuente generadora de las ondas gravitatorias. En este sentido los observatorios espaciales, como el LISA, formado por tres satélites, uno que ejercerá el papel de fuente de luz y observador, y otros dos que contendrán los espejos del extremo final de los dos brazos del interferómetro, de una longitud de un millón de kilómetros, y que se espera que pueda entrar en funcionamiento alrededor de 2030, podrán aportar información de gran valor para completar la que se obtenga con los observatorios terrestres.

¿Cómo se forman realmente los agujeros negros? ¿Es la teoría de la relatividad general la que describe correctamente la gravedad? ¿Cómo se desenvuelve la materia en condiciones extremas de presión y temperatura en sistemas estelares como estrellas de neutrones o supernovas? ¿Existió realmente la *inflación* en la expansión del universo? Cabe esperar pues que las grandes cuestiones aún sin responder de la astrofísica puedan empezar a ser resueltas con la ayuda de las ondas gravitatorias.

¿De qué está hecha la materia?

Esta pregunta, así como otra que surge de forma inmediata, referida a cuáles son los mecanismos que dictan la interacción entre sus componentes, han dado pie a grandes experimentos que se han llevado a cabo a lo largo de la historia de la física. El Gran Colisionador de Hadrones es el último de ellos.

El *modelo estándar* lo explica todo. O mejor dicho, a día de hoy no existe ningún experimento cuyos resultados contradigan lo que establece dicho modelo. O casi. En relación, claro, con cuáles son los constituyentes fundamentales de la materia conocida y cómo interactúan entre ellos. Sin embargo, esta situación no es nueva y a lo largo de la historia de la física ha habido momentos en los que el paradigma hasta entonces asumido, que daba cuenta de cualquier observación empírica, saltaba hecho trizas una vez que algún resultado experimental falsaba los presupuestos de la teoría prevalente. A pesar de ello, la búsqueda de esos constituyentes fundamentales ha animado a la ciencia, en general, y a la física, en particular, desde siempre.

Solo muchos siglos después de su muerte, el modelo de universo de Aristóteles cedió ante la pertinaz evidencia de los resultados experimentales, dando pie a una revolución científica, que se mostró en todo su esplendor durante los siglos XVI y XVII, con Galileo y Newton como figuras más relevantes, pero que ya iniciara Copérnico con la hipótesis heliocéntrica propuesta en su libro *De revolutionibus orbium coelestium* (*Sobre las revoluciones de las esferas celestes*).

Para Aristóteles, el universo era finito y esférico y estaba formado por sucesivas capas concéntricas en cuyo centro se encontraba, estática, la Tierra, que también era esférica. Aristóteles distinguía dos regiones en el universo con comportamientos completamente diferentes. La primera era la *supralunar* y en ella todo movimiento era regular y predecible. Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno (los planetas entonces conocidos), la propia Luna, el Sol y las estrellas evolucionaban con armonía perfecta en esta región. A la segunda la denominaba región *sublunar*. Todo lo que existía en la Tierra, y entre esta y la Luna, discurría en esta región con cambios continuos, sin que fuera posible establecer leyes matemáticas para su descripción, dada la diversidad existente.

Sin embargo, a pesar de que todo en la región sublunar giraba en torno a la naturaleza, un ente intrínsecamente caótico, Aristóteles propugnaba que todos los cuerpos presentes en esa región estaban constituidos por cuatro elementos fundamentales: tierra, agua, aire y fuego. Era esta una hipótesis que venía de antiguo, ya que un siglo antes, hacia 450 a.C., Empédocles definió esos elementos como las cuatro *raíces* de las que todas las estructuras del mundo están constituidas. Y fue Platón, maestro de Aristóteles, quien introdujo el término «elemento» en este contexto. En cualquier caso, Aristóteles, como antes había admitido el filósofo griego Anaxágoras, pensaba que la materia era continua e infinitamente subdivisible, una opinión contraria a la concepción atomista de Demócrito y Leucipo, filósofos griegos de los siglos v y iv a.C.

El funcionamiento de cada uno de los cuatro elementos era relativamente simple y se regía por su «gravedad específica», que era en última instancia la responsable de determinar el «lugar de reposo natural» que cada uno de ellos debía ocupar. Así, la tierra, cuya gravedad específica era la más alta, se concentraba en el centro de nuestro planeta. El agua se situaba sobre la tierra y por encima de ambas se encontraba el aire. El fuego, el más ligero de los elementos, tendía a moverse hacia los extremos de la región sublunar. Cada cuerpo existente en dicha zona se movía de acuerdo a las cantidades de los cuatro elementos fundamentales que lo constituían.

Este afán simplificador para explicar la constitución de la materia y su evolución no ha sido, sin embargo, exclusivo de la civilización occidental. Hacia el año 180 a.C., en China se utilizaba la *teoría Wu Xing* para dar cuenta de fenómenos tan dispares como los ciclos cósmicos, las propiedades de los medicamentos, el funcionamiento de los órganos internos del cuerpo de los animales e, incluso, la sucesión de los regímenes políticos. Las cinco *fases*, a saber, madera, fuego, tierra, metal y agua, interactuaban entre ellas en un ciclo de generación y otro de destrucción y estaban relacionadas con distintos materiales, con los planetas, con los colores, las formas geométricas, el clima, las estaciones, etc.

Mucho más recientemente, hacia el 350 de nuestra era, en la India, la *teoría Samkhya* consideraba que todo estaba formado por cinco componentes fundamentales: los cuatro elementos griegos y el espacio.

LA MATERIA POR DENTRO

Pero la carrera real hacia el esquema constitutivo que hoy día se admite como correcto no empezó hasta la mitad del siglo xvii. En 1661, el físico y químico angloirlandés Robert Boyle publicó un libro titulado *El químico escéptico* en el que se hacía por vez primera referencia explícita a las moléculas con el apelativo de «grupos de partículas». Además, Boyle argumentó que los elementos básicos de la materia eran «corpúsculos» de distintos tipos y tamaños, capaces de organizarse en grupos. A partir de ese instante, la teoría molecular se desarrolló sin pausa. En 1718, el químico francés Étienne F. Geoffroy formuló la teoría de la *afinidad química* para explicar el porqué de las distintas combinaciones químicas. En 1738, Daniel Bernoulli, físico y matemático suizo, estableció las bases de la teoría cinética de los gases. En 1789, el químico irlandés William Higgins esbozó lo que con el paso del tiempo serían los *enlaces químicos* y dio una de las primeras visiones de la teoría atómica de la materia, a la que dio un espaldarazo definitivo el físico y químico inglés John Dalton

en 1803, cuando indicó que los átomos de diferentes elementos químicos tienen masas diferentes y adoptó el peso atómico del hidrógeno como unidad para medirlos. Unos años más tarde, en 1811, Amedeo Avogadro estableció la ley que lleva su nombre y que permitía obtener los pesos moleculares de las distintas especies a partir de los pesos de muestras de gas de esas especies, con el mismo volumen y sometidas a las mismas presión y temperatura.

Posteriormente hubo tres hechos relevantes. El primero en 1873, fecha en la que el físico escocés James C. Maxwell publicó en *Nature* un artículo titulado «Moléculas» en el que indicaba lo siguiente: «Un átomo es un cuerpo que no puede ser dividido en dos; una molécula es la porción más pequeña posible de una sustancia».

El segundo data de 1916. Ese año el químico estadounidense, Gilbert N. Lewis, sobre la base de un trabajo del físico y químico inglés Alfred L. Parson (entonces un estudiante recién licenciado de visita en la Universidad de California en Berkeley), estableció que los enlaces entre átomos en las moléculas se debían a que esos átomos compartían uno o varios electrones.

El último se debe a Linus C. Pauling, químico estadounidense quien, alrededor de 1920, cuando aún era estudiante de la carrera, decidió aplicar la teoría cuántica, que entonces había empezado a desarrollarse, para explicar el enlace químico. Ese fue el punto de inicio de una nueva disciplina, la química cuántica, en cuyos primeros tiempos descollaron físicos de la talla del estadounidense Fritz W. London, alemán de origen, y del alemán Walter H. Heitler. Pauling se hizo acreedor al premio Nobel de Química en 1954 por sus trabajos acerca de la estructura de las moléculas.

MIRANDO MÁS EN DETALLE

Como había indicado Maxwell, los átomos fueron considerados como indivisibles hasta finales del siglo XIX. Pero en 1897, el físico inglés Joseph J. Thomson descubrió el *electrón* (término que

había sido introducido por el físico británico George J. Stoney en 1874). En sus experimentos con tubos de rayos catódicos fue capaz de medir la relación entre su carga y su masa y argumentó que los átomos que conformaban las moléculas no solo no eran indivisibles, sino que estaban compuestos por esas nuevas partículas que acababa de descubrir.

Para llegar aquí, sin embargo, había sido necesario un número considerable de resultados experimentales a lo largo de todo el siglo. Ya hemos comentado antes que Dalton había procedido de manera simplista logrando con ello una interpretación sencilla de los pesos relativos con los que los elementos se combinan en las distintas sustancias. Años más tarde, en 1815, el químico y físico inglés William Prout notó que los pesos atómicos, aún no muy bien conocidos entonces, estaban próximos a múltiplos enteros del peso del átomo de hidrógeno. En realidad esto era solo una aparente casualidad, ya que cuando se dispuso de medidas más precisas se constató que los pesos atómicos no eran enteros, toda vez que corresponden a valores medios de los distintos isótopos presentes en las muestras naturales analizadas y, además, incluyen la «pérdida de masa» que se produce cuando los átomos se forman a partir de sus constituyentes.

También el químico y físico inglés Michael Faraday puso su grano de arena al demostrar, con los experimentos que cristalizaron en sus leyes de la electrolisis, la íntima relación existente entre la carga eléctrica y la estructura de los átomos, así como la «atomicidad» de dicha carga. Sobre esta característica fundamental incidió también el físico y médico alemán Hermann L. von Helmholtz, quien, en 1881, en una conferencia que impartió en la *Chemical Society* de Londres, indicó que «si aceptamos la hipótesis de que las sustancias elementales están compuestas de átomos, no podemos dejar de concluir que la electricidad, tanto positiva como negativa, está también dividida en porciones elementales definidas que se comportan como átomos de electricidad».

En 1869, el químico ruso Dmitri I. Mendeléyev, al ordenar los elementos conocidos según sus pesos atómicos, encontró una periodicidad asociada con las propiedades químicas de los mis-

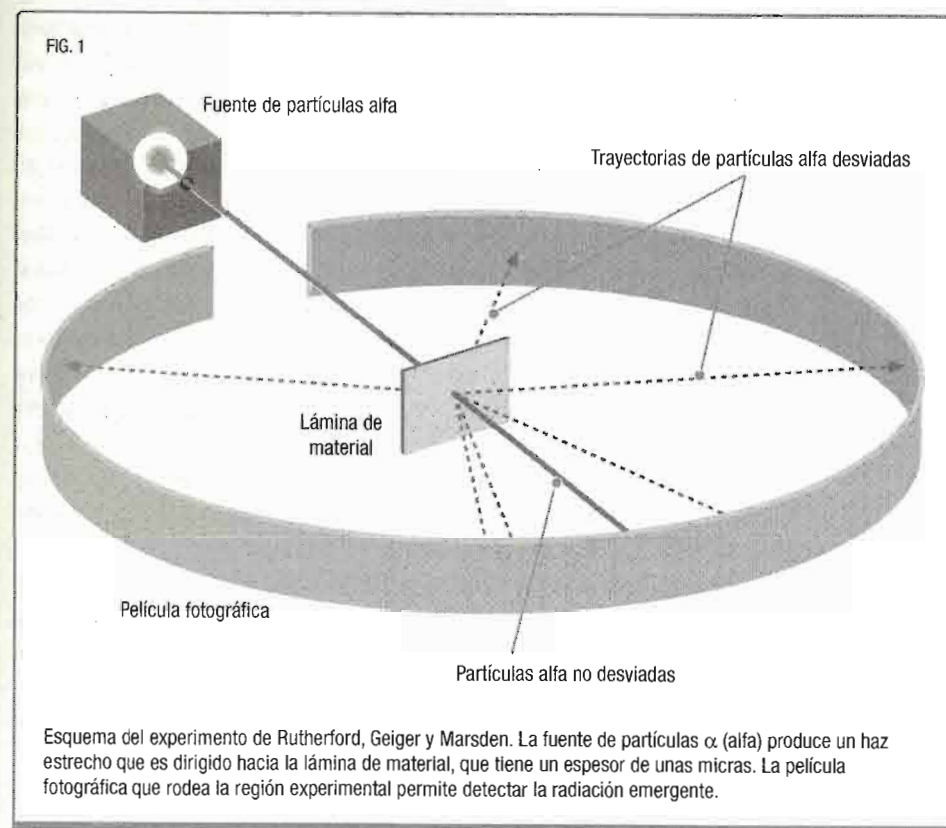
mos y estableció el *sistema periódico*, la primera evidencia convincente de la existencia de un modelo común para la estructura de todos los átomos, cualesquiera que fueran los elementos a los que pertenecían.

El modelo atómico de Thomson resultó, sin embargo, deficiente. Desde su punto de vista, los electrones que conformaban los átomos debían moverse alrededor de posiciones fijas convenientemente distribuidas en un volumen de carga positiva igual al total de carga negativa de esos electrones (haciendo así que el átomo fuera neutro). Las distancias entre electrones proporcionaban la estabilidad del sistema y los movimientos de estos alrededor de sus posiciones de equilibrio podrían dar cuenta de los numerosos datos experimentales espectroscópicos que se habían acumulado desde que Newton llevara a cabo la descomposición de la luz blanca mediante un prisma óptico. Pero en 1911, el físico y químico neozelandés Ernest Rutherford y dos de sus estudiantes, el alemán Johannes W. Geiger y el británico Ernest Marsden, llevaron a cabo uno de los experimentos más importantes de la física. Enviaron radiación α (alfa), procedente de elementos radiactivos, contra láminas delgadas de diferentes materiales y rodearon la cámara de colisión con película fotográfica que hacía las veces de detector de la radiación emergente (figura 1). Encontraron dos resultados inesperados: que la mayor parte de las partículas α no eran desviadas de su trayectoria inicial y que algunas de las que lo eran alcanzaban la película con un ángulo de dispersión muy grande. Si el modelo de Thomson hubiera sido correcto, prácticamente todas las partículas α habrían sido desviadas pero en todos los casos con ángulos de dispersión muy pequeños.

A la vista de esos resultados experimentales, Rutherford propuso un modelo revolucionario: el átomo estaba constituido por un núcleo que contenía casi toda la masa del átomo y estaba cargado positivamente, mientras que los electrones orbitaban alrededor de él y a distancias, en promedio, muy grandes comparadas con las dimensiones del núcleo. La materia estaba pues esencialmente «vacía», y de ahí que la mayor parte de las partículas atravesaran la lámina blanca sin sufrir desviación alguna.

Esta estructura fue aprovechada por Niels H.D. Bohr para establecer, en 1913, su teoría del átomo y explicar los numerosos datos experimentales espectroscópicos del átomo de hidrógeno entonces conocidos.

Ese mismo año, Thomson pudo medir la relación carga/masa de varios iones así como demostrar la existencia de los isótopos, formas «distintas» de los elementos químicos que un poco antes habían predicho el químico inglés Frederick Soddy y el físico y químico polaco Kasimir Fajans después de un sistemático estudio de las propiedades químicas de los elementos radiactivos presentes en la naturaleza. Dichas propiedades quedaron desde entonces ligadas al número de electrones que contenía el átomo



correspondiente orbitando alrededor del núcleo. Este, por su parte, solo podía considerarse constituido por un número adecuado de protones y electrones, las únicas partículas entonces conocidas, de forma que tanto su masa como su carga estuvieran correctamente descritas. Sin embargo, esa constitución no permitía explicar otras propiedades nucleares.

Hubo que esperar hasta 1932, cuando el físico inglés James Chadwick descubrió el neutrón, una partícula con una masa ligeramente superior a la del protón y sin carga eléctrica. Chadwick recibió el premio Nobel en 1935 por su descubrimiento y la estructura del núcleo pudo ser establecida: Werner K. Heisenberg, alemán, y Dmitri D. Ivanenko, soviético, propusieron que en realidad los núcleos eran amalgamas de protones y neutrones y no contenían electrones. Estos solo se encontraban pues orbitando a su alrededor formando los átomos.

EL MODELO ESTÁNDAR

El año 1932 marcó la apertura de la carrera de la «caza» de las partículas subatómicas. Ese año, el físico estadounidense Carl D. Anderson descubrió el positrón, la antipartícula del electrón, que había sido postulada por el físico teórico inglés Paul A.M. Dirac en 1928. El propio Anderson, cuatro años más tarde, junto con el físico estadounidense Seth H. Neddermeyer, descubrió el muon, una partícula de características similares al electrón pero con una masa unas doscientas veces mayor. En 1947, los físicos Cecil F. Powell, inglés y premio Nobel de Física en 1950, Cesare M.G. Lattes, brasileño, y Giuseppe P.S. Occhialini, italiano, todos ellos trabajando en la Universidad de Bristol (Reino Unido), descubrieron el pion analizando placas fotográficas expuestas a los rayos cósmicos. También en 1947, y analizando asimismo los rayos cósmicos con una cámara de niebla, los físicos británicos Clifford C. Butler y George D. Rochester descubrieron el kaon, la primera de las partículas caracterizada con un número cuántico nuevo: la *extrañeza*. En 1950, a partir de placas fotográficas que habían irradiado en un globo que ascendió por encima

de 21000 m de altitud, el físico australiano Victor D. Hopper y el indio Sukumar Biswas descubrieron la partícula Λ (lambda). Y en 1956, los físicos estadounidenses Clyde L. Cowan y Frederick Reines descubrieron el neutrino, por lo que recibieron el premio Nobel de Física en 1995. El neutrino había sido propuesto por Wolfgang E. Pauli en 1930 para explicar la conservación de la energía en la desintegración β (beta). Pauli recibió el premio Nobel en 1945 por la formulación del principio de exclusión que lleva su nombre.

Aunque el número de partículas conocidas siguió creciendo de manera ininterrumpida, desde un principio se fueron agrupando de acuerdo a algunas de sus propiedades. Así se establecieron dos grandes grupos: *leptones* y *hadrones*, estos últimos formados por los *bariones* y los *mesones*. La diferencia entre ellos es que los leptones no sienten la denominada *fuerza fuerte*, que es una de las interacciones fundamentales de la naturaleza, esto es, las fuerzas que actúan entre las partículas. Dichas interacciones son cuatro: la *gravitatoria*, la *electromagnética*, la *débil* y la *fuerte*. En la tabla se indican algunas de las propiedades fundamentales de esas fuerzas.

La fuerza más intensa es la fuerte y la teoría que la describe se conoce como *cromodinámica cuántica*. Su alcance, esto es, la distancia en la que es apreciable su acción, es del orden del

Interacción	Teoría descriptiva	Intensidad relativa	Alcance (m)
Gravitatoria	Teoría de la relatividad	10^{-38}	Infinito
Electromagnética	Electrodinámica cuántica	10^{-2}	Infinito
Débil	Teoría electrodébil	10^{-7}	10^{-18}
Fuerte	Cromodinámica cuántica	1	10^{-15}

Interacciones fundamentales de la naturaleza. Se indica la teoría que describe cada una de ellas, su intensidad relativa respecto de la de la interacción fuerte y su alcance.

tamaño de los núcleos atómicos, unos 10^{-16} m. La fuerza gravitatoria es la más débil de todas y tiene un alcance infinito. Actúa sobre cualquier partícula que tenga masa y la teoría de la relatividad general es la que explica cómo lo hace. Es la responsable, por ejemplo, de la dinámica que rige el comportamiento de los objetos estelares. La interacción electromagnética está descrita por la *electrodinámica cuántica* y también tiene alcance infinito, aunque se pone en juego sobre partículas con carga eléctrica. Como vemos, es unas 100 veces menos intensa que la fuerza fuerte. Por último tenemos la fuerza débil, cuya intensidad es cinco órdenes de magnitud inferior a la electromagnética. Está descrita por la *teoría electrodébil*, que da cuenta, simultáneamente, tanto de la fuerza débil como de la electromagnética, que se consideran, por tanto, *unificadas*. La fuerza débil es de muy corto alcance, mucho menor que el tamaño de los nucleones que conforman el núcleo, y se pone en juego en determinados procesos radiactivos, como la desintegración β .

Esas interacciones se describieron desde un principio en términos de lo que en física se conoce como *campos de fuerza*, de manera que cuando dos partículas interactuaban según una fuerza concreta, intercambiaban una partícula que recibió el nombre de *bosón intermediario*. Así, por ejemplo, el fotón es la partícula asociada con la interacción electromagnética.

Las partículas también se clasificaron según otra de sus propiedades: el espín, una de sus características intrínsecas, como lo son la masa o la carga eléctrica. El espín había sido introducido en 1925 para poder explicar los resultados experimentales de espectroscopía entonces disponibles, por el estadounidense de origen alemán Ralph Kronig y, de manera independiente, por los físicos teóricos neerlandeses Samuel Goudsmit y George E. Uhlenbeck. Dos años más tarde, se tuvo constancia directa de su existencia al reanalizar los resultados de un experimento realizado en 1922 por los alemanes Otto Stern, premio Nobel en 1943, y Walther Gerlach.

Pues bien, de acuerdo a su espín las partículas se agruparon en *fermiones* y *bosones*. Los fermiones se caracterizan por tener un valor semiimpar del espín y se ven afectados por el *principio de exclusión de Pauli*, un principio mecánico-cuántico que esta-

blece que dos fermiones idénticos no pueden ocupar el mismo estado cuántico simultáneamente. Estos fermiones se rigen por la denominada *estadística de Fermi-Dirac* y entre ellos se encuentran los leptones y los bariones, así como muchos núcleos y átomos. El protón, el neutrón y el electrón son fermiones con espín $1/2$ y por ello todos los núcleos que tienen un número impar de nucleones y todos los átomos que tengan un número impar de protones más neutrones más electrones son también fermiones. Por su parte, los bosones tienen un valor entero del espín y cumplen con la *estadística de Bose-Einstein*. Entre ellos se encuentran el fotón y los mesones.

Los núcleos y los átomos que contienen un número par de componentes también se comportan como bosones. Y son asimismo de ese mismo tipo los ya mencionados bosones intermediarios.

Del impresionante ritmo con el que el zoológico de partículas se fue incrementando dan testimonio los sucesivos *Review of particle physics* que, desde 1957, ha venido publicando el *Particle Data Group*, la colaboración internacional encargada de resumir la física de partículas. En la primera edición, que contaba con tan solo 19 páginas, aparecían listados el fotón, tres leptones (el neutrino, el electrón y el muon), cuatro mesones (el pion cargado, el pion neutro, el kaon cargado y el kaon neutro), así como ocho bariones: el protón, el neutrón, la partícula Λ , tres partículas Σ (sigma), una positiva, otra negativa y otra neutra, y dos partículas Ξ (xi), una cargada y otra neutra. La última versión del *Review of particle physics*, publicada en 2014, con una actualización en 2015, alcanza la friolera de 1676 páginas.

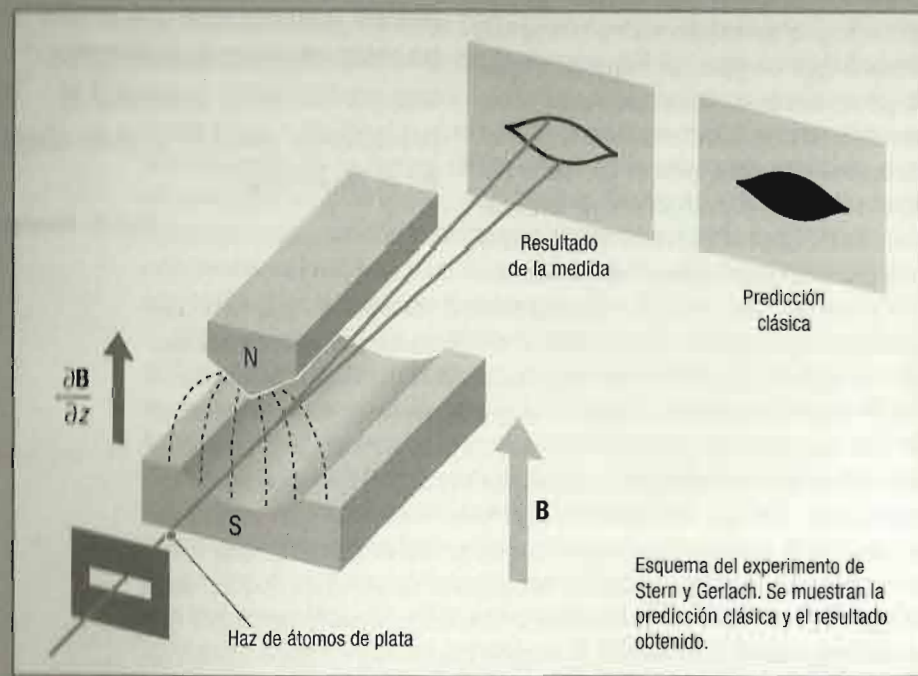
En cualquier caso, al principio de la década de 1960 empezaron a fraguarse dos líneas de investigación que confluyeron en una nueva visión de la situación. Por un lado, el estadounidense Sheldon L. Glashow encontró en 1961 una manera de describir conjuntamente las interacciones electromagnética y débil, un pro-

El átomo debe ser estudiado mediante pruebas indirectas, una dificultad técnica comparada con pedirle a un hombre que jamás ha visto un piano que describa uno por el sonido que haría al precipitarse hasta el piso de abajo en la oscuridad.

CARL D. ANDERSON

EL EXPERIMENTO DE STERN Y GERLACH

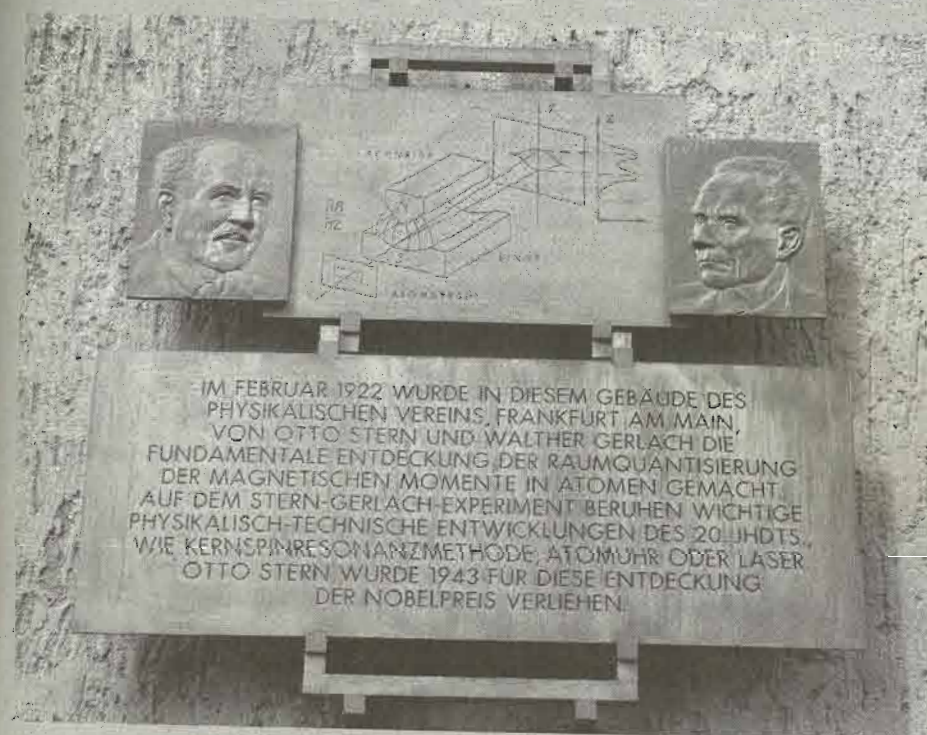
En 1920 los alemanes Otto Stern y Walther Gerlach llevaron a cabo un experimento que con el paso del tiempo resultó tener una importancia capital en el marco del desarrollo de la mecánica cuántica, que en aquel momento estaba en su punto álgido. El experimento en sí es muy simple. Un haz de átomos neutros de plata, producido evaporando metal en un horno, se collma mediante varias rendijas y se hace pasar a través de un campo magnético B no homogéneo, con un gradiente, $\partial B / \partial z$, creciente y grande, en la misma dirección del campo (véase la figura).



Camino hacia la introducción del espín

Como los átomos son neutros, su única interacción con el campo magnético es a través de su momento angular intrínseco, μ , que es debido al espín atómico. Si el campo fuese homogéneo, esto es, constante en todo el espacio donde actúa, no existiría ninguna fuerza neta sobre los átomos y sus trayectorias a lo largo de la región donde se aplica el campo serían rectilíneas. Lo mismo ocurriría en ausencia de campo magnético. Pero si el campo no es homogéneo, sobre el centro de masa del átomo actúa una fuerza que es proporcional a la magnitud de la proyección de su momento magnético permanente sobre la dirección del campo y a la intensidad del campo, fuerza que modifica las trayectorias de los átomos, que serán casi parabólicas, desviándose de

la dirección de entrada en la zona del campo magnético. Clásicamente, se consideraba que la orientación del momento magnético permanente de los distintos átomos era aleatoria, por lo que sus proyecciones podían tomar todos los valores comprendidos en el intervalo $[-\mu, +\mu]$, siendo μ la magnitud del momento magnético intrínseco del átomo. Como puede verse en la figura, la «mancha» que provoca el impacto del haz sobre la película fotográfica no es continua, sino que marca solo los «bordes» de la zona predicha por la teoría clásica, que corresponden a los dos valores extremos del intervalo: $-\mu$ y $+\mu$. De esta forma quedaba demostrado que la proyección de los resultados experimentales en los que se basó la introducción del espín. Cabe pensar que el mismo tipo de experimento se podría haber hecho con un haz de electrones o protones, es cierto, pero al ser partículas cargadas la interacción del campo magnético con la carga enmascararía el efecto debido al espín y no habría sido posible establecer las mismas conclusiones.



Placa conmemorativa del experimento de Otto Stern (a la izquierda) y Walther Gerlach y que se encuentra en la sede de la Sociedad de Física de Frankfurt.

cedimiento que en 1967 fue formalizado por el estadounidense Steven Weinberg y el paquistaní M. Abdus Salam y por el que los tres compartieron el premio Nobel de Física en 1979. El espaldarazo a la que, desde entonces, se conoce como teoría electrodébil tuvo lugar en 1983, cuando fueron descubiertas las partículas W^+ y Z^0 , los bosones mediadores asociados con la interacción débil.

La otra línea afectaba a la interacción fuerte. En 1964, los estadounidenses Murray Gell-Mann y George Zweig propusieron de manera independiente la idea de que los numerosos hadrones que entonces eran ya conocidos no eran partículas fundamentales, sino que estaban formados por otras a las que Gell-Mann denominó *quarks*, apropiándose de una palabra que aparece en un libro del novelista y poeta irlandés James A.A. Joyce: *Finnegans Wake*. Inicialmente se postularon tres sabores o tipos de quarks que recibieron los nombres de: *up* (arriba), *down* (abajo) y *strange* (extraño). Los quarks eran fermiones de espín $1/2$ y su carga eléctrica era una fracción de la del electrón ($+2/3$ para el *up* y $-1/3$ para los otros dos). El protón estaba formado por dos quarks *up* y uno *down*, mientras que el neutrón lo constituían un quark *up* y dos *down*. Otras partículas incluían quarks *strange*. A pesar de lo atractivo de la propuesta, existieron reticencias acerca de si las nuevas partículas constituyentes eran reales o una entelequia que simplemente permitía una descripción más sencilla de la casuística experimental.

El mismo año de la propuesta de Gell-Mann y Zweig, Glashow y otro físico teórico estadounidense, James D. Bjorken, propusieron un nuevo quark: el *charm* (encanto). Con ello consiguieron mejorar la descripción de la interacción débil y, además, igualar el número de quarks con el de leptones entonces conocidos. Y en 1973, los japoneses Makoto Kobayashi y Toshihide Maskawa, galardonados con el premio Nobel de Física en 2008, demostraron que el número de quarks debía ser de 6. Los dos quarks que faltaban fueron bautizados por el israelí Haim Harari en 1975 con los nombres de *top* (cima) y *bottom* (fondo).

Una de las curiosidades de los quarks era cómo aparecían en la naturaleza. No era posible encontrarlos aisladamente, sino en combinaciones de 3 quarks (dando lugar a los distintos bariones)

o en parejas quark/antiquark (constituyendo los mesones). Además, los quarks tenían una característica fundamental que, en el argot de la mecánica cuántica, se denominó *carga de color* y fue asociada con un nuevo número cuántico: el *color*. Se asumió que los posibles estados de color eran tres (que se etiquetaban arbitrariamente como *rojo*, *verde* y *azul*) y que las combinaciones de quarks debían ser de tal forma que el objeto compuesto correspondiente no tuviera color. Los tres quarks que formaban un barión debían tener colores complementarios y dar una combinación «blanca», de la misma manera que ocurre en óptica. Por su parte los antiquarks tendrían asignado un «anticolor», y de esa forma los mesones también resultaban incoloros. La carga de color es fundamental puesto que en ella se basa la interacción fuerte, que es mediada por el intercambio de *gluones*, unas partículas que, al igual que los fotones, tienen espín 1. Para garantizar las propiedades de simetría que dicha interacción debía verificar, se vio que eran necesarios ocho gluones correspondientes a distintas combinaciones de estados de color.

En 1968 tuvo lugar un hecho muy relevante. En el Centro del Acelerador Lineal de Stanford (SLAC, por sus siglas en inglés) se llevaron a cabo una serie de experimentos cuyo objetivo era estudiar la distribución de carga en el interior del protón. Para ello se hizo uso de la *dispersión profundamente inelástica* de electrones por núcleos y se encontró que los protones contenían en su interior partículas más pequeñas y dejaban por tanto de poder considerarse como fundamentales. El físico estadounidense Richard P. Feynman denominó a esas partículas *partones* y se tardó algún tiempo en aceptar que partones y quarks hacían referencia a las mismas partículas constituyentes.

A partir de ese momento fueron apareciendo evidencias del modelo de quarks que, junto con la teoría electrodébil, dieron lugar al modelo estándar. Lo más importante es que ninguno de los resultados experimentales obtenidos hasta la fecha en relación con la física atómica y subatómica ha contradicho las predicciones de ese modelo que, fundamentalmente, nos dice que toda la materia conocida está formada por combinaciones de doce partículas, fermiones de espín $1/2$, seis quarks y seis lep-

tones, así como sus correspondientes antipartículas. Partículas y antipartículas interactúan mediante las fuerzas fundamentales a las cuales están asociados los correspondientes bosones intermedios: los gluones, los fotones y las partículas W^\pm y Z^0 . Los quarks sentirían todas las interacciones; los leptones no sufrirían los efectos de la interacción fuerte. Por otro lado, la interacción gravitatoria, cuyo bosón intermedio sería el *gravitón*, aún no descubierto, queda fuera del modelo.

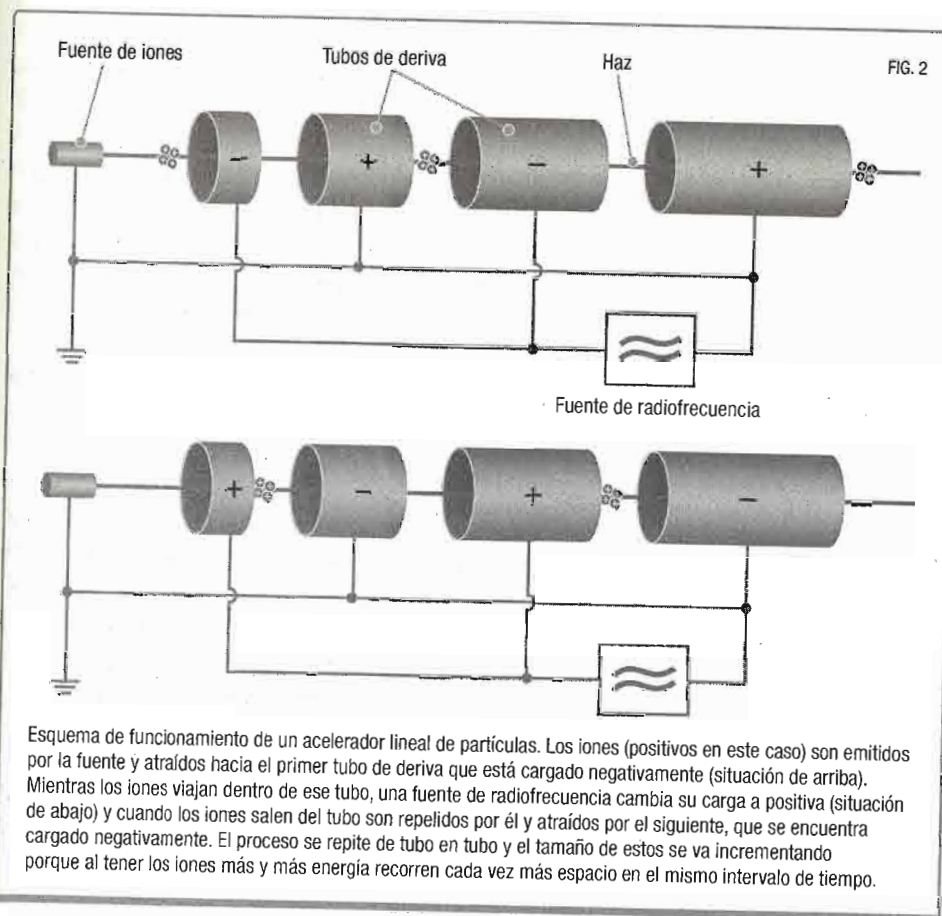
ACELERANDO PARTÍCULAS

Los rayos cósmicos alcanzan la Tierra desde fuera del sistema solar y están formados por radiación muy energética que produce, en su interacción con la atmósfera, cascadas de partículas que pueden incluso alcanzar la superficie terrestre. Como hemos indicado antes, varios de los primeros descubrimientos de partículas se llevaron a cabo analizando las trazas que estos rayos cósmicos dejaban en películas fotográficas expuestas a ellos en distintas circunstancias. No es esta, sin embargo, la única posibilidad para producir reacciones del tipo que interesa en este contexto. Rutherford y sus colaboradores realizaron a principios del siglo xx muchos experimentos usando como fuente de radiación radioisótopos de distintos elementos, lo que les permitió indagar sobre la estructura de los átomos y los núcleos.

Pero ya al final de la década de 1920 se plantearon otras opciones que permitían disponer de haces de partículas con energías muy por encima de las que podían proporcionar los radioisótopos: los aceleradores. Desde el principio se abordó el problema siguiendo dos aproximaciones diferentes. Por un lado estaban los *aceleradores lineales* en los que la partícula que se trataba de acelerar seguía una trayectoria rectilínea. Los primeros diseños de este tipo de dispositivos datan de 1928 y son obra del noruego Rolf Widerøe, un físico de aceleradores al que se deben muchos procedimientos básicos utilizados en la aceleración de partículas. Su idea, basada en un concepto del húngaro Leó Szilárd, era la de atraer un ion positivo hacia

un tubo metálico cargado negativamente y durante el recorrido del ion dentro del tubo (en el que no se ejerce fuerza alguna sobre él) cambiar el potencial a positivo de manera que cuando el ion saliera del tubo fuera repelido incrementando su energía. Disponiendo varios tubos con tamaños crecientes y separados entre sí a las distancias adecuadas se podía repetir el proceso y lograr acelerar los iones a varios MeV de energía (figura 2).

También del tipo lineal era el dispositivo que crearon el inglés John D. Cockcroft y el irlandés Ernest T.S. Walton mientras trabajaban con Rutherford en el laboratorio Cavendish. El acelerador



que lleva sus nombres no era más que un transformador de 200 kV que permitía acelerar protones en un tubo de descarga. El objetivo era hacer colisionar los protones acelerados con núcleos de distintos elementos y producir su desintegración. Pero en 1930 sus intentos resultaron fallidos porque la energía de los protones era demasiado baja. Sin embargo, mejoraron el diseño y mediante un multiplicador de voltaje consiguieron alcanzar los 800 kV, una diferencia de potencial suficiente para que los protones pudieran romper núcleos de ${}^6_3\text{Li}$ en dos partículas alfa (es decir, dos núcleos de ${}^4_2\text{He}$). El experimento lo realizaron en 1932 y fueron galardonados por ello con el premio Nobel de Física en 1951.

Otro acelerador lineal es el que inventó allá por 1930 el estadounidense Robert J. Van de Graaff. Se trataba de un dispositivo basado en propiedades fundamentales de la electrostática y en él una cinta de material aislante transportaba carga eléctrica desde un punto fuente hasta una esfera hueca que la acumulaba. Una segunda esfera dispuesta en similares circunstancias era cargada con carga de distinto signo y ello permitía establecer una diferencia de potencial entre ambas que era la que se utilizaba para acelerar las partículas. La carga de las esferas estaba limitada por la aparición de arcos voltaicos entre ellas, pero podía incrementarse la diferencia de potencial aumentando el tamaño de las mismas. En 1931, Van de Graaff alcanzó 1,5 MV y comenzó a planificar la construcción de un dispositivo con esferas de 4,5 m de diámetro.

Los aceleradores lineales fueron evolucionando con el tiempo y la tecnología cambió cuando se empezaron a utilizar cavidades resonantes como tubo de aceleración. En esas cavidades se introduce una microonda de radiofrecuencia que es la que proporciona energía a las partículas que se quieren acelerar. Este tipo de diseño ha permitido acortar notablemente la longitud de los tubos aceleradores y, entre otras aplicaciones, construir aceleradores de dimensiones relativamente reducidas y que pueden utilizarse en radioterapia del cáncer en los hospitales.

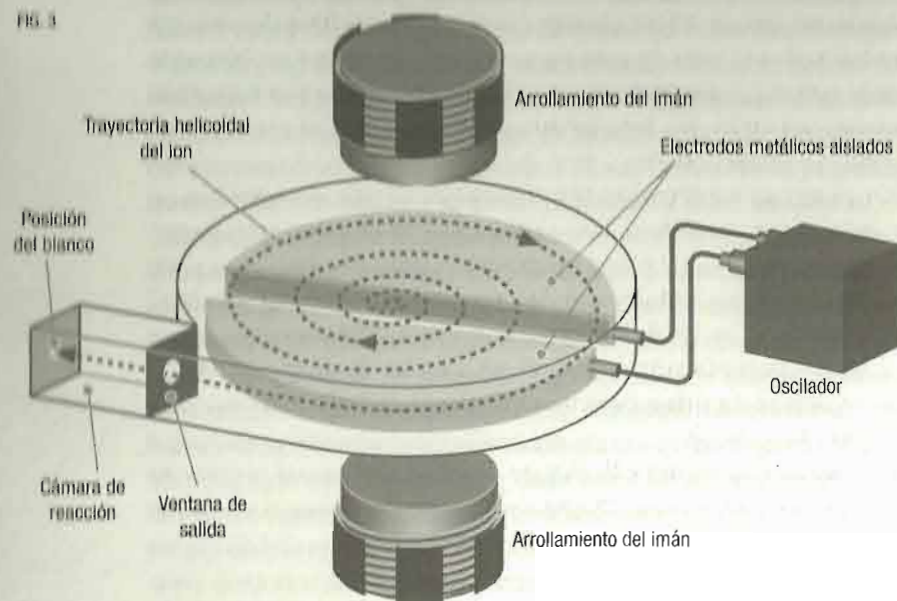
Una de las desventajas de los aceleradores lineales es que cuanto mayor es la energía que se quiere alcanzar, más grande debe ser su longitud. Este problema se soluciona en parte con el segundo de los tipos de diseño que se consideraron desde el

principio: los *aceleradores circulares*. En general estos aceleradores se basan en el uso simultáneo de campos eléctricos y magnéticos, los primeros dando lugar, fundamentalmente, al incremento en la energía de las partículas aceleradas y los segundos haciendo que las trayectorias de esas partículas sean circulares.

Aunque el alemán Max C.T. Steenbeck había desarrollado el concepto en 1927 y Szilárd lo había patentado en 1929, fueron los estadounidenses Ernest O. Lawrence y M. Stanley Livingston, este último estudiante de doctorado del primero, quienes construyeron a principios de la década de 1930 varios modelos de ciclotrón, el primero de los aceleradores circulares. En 1932 pusieron en marcha en la Universidad de California en Berkeley un dispositivo de 69 cm de diámetro que se basaba en otro mucho más pequeño, de apenas 12 cm de diámetro, que permitía acelerar iones de hidrógeno hasta los 80 keV y que se usó como prueba de concepto. Livingston desarrolló el diseño y la construcción del dispositivo en su tesis doctoral pero solo Lawrence recibió el premio Nobel de Física en 1939 por estos trabajos. El ciclotrón estaba formado por dos electrodos huecos en forma de «D», enfrentados entre sí por la parte de sección recta (figura 3), cargados con cargas contrarias, conectados a un oscilador de radiofrecuencia y que se encontraban en el seno de un campo magnético constante y uniforme. Los iones, inyectados en el centro del acelerador, eran atraídos o repelidos por los dos electrodos, según su carga, cuando estaban en la región entre ambos, aumentando su energía progresivamente, mientras que cuando se encontraban en el interior de algunos de ellos describían trayectorias circulares debido a la presencia del campo magnético. El oscilador modificaba la polaridad de los electrodos justo cuando el ion salía de uno de ellos y el proceso se repetía hasta alcanzar la energía deseada.

Desde ese momento han sido muchos los tipos y diseños de aceleradores circulares, entre los que cabe mencionar el sincrociclotrón, el ciclotrón isócrono, el betatrón, el sincrotrón, etc. En general, las instalaciones actuales suelen incluir distintos tipos de aceleradores, algunos de los cuales sirven como inyectores de otros, lo que permite alcanzar energías más altas. De entre las instalaciones más importantes del mundo cabe señalar aquí el

FIG. 3



Esquema de un ciclotrón. Los iones se inyectan en el centro del dispositivo y son atraídos hacia el electrodo con carga contraria. Dentro del electrodo el ion solo siente el campo magnético que lo hace girar y cuando va a salir de él, el oscilador de radiofrecuencia cambia la polaridad de manera que el ion es repelido por uno de los electrodos y atraído por el otro, aumentando su energía. El proceso se repite varias veces hasta que alcanza la energía requerida y es extraído hacia la cámara de reacción donde está situado el blanco.

Fermilab, cerca de Batavia (Estados Unidos), fundado en 1967, y el GSI, en Darmstadt (Alemania), creado en 1969.

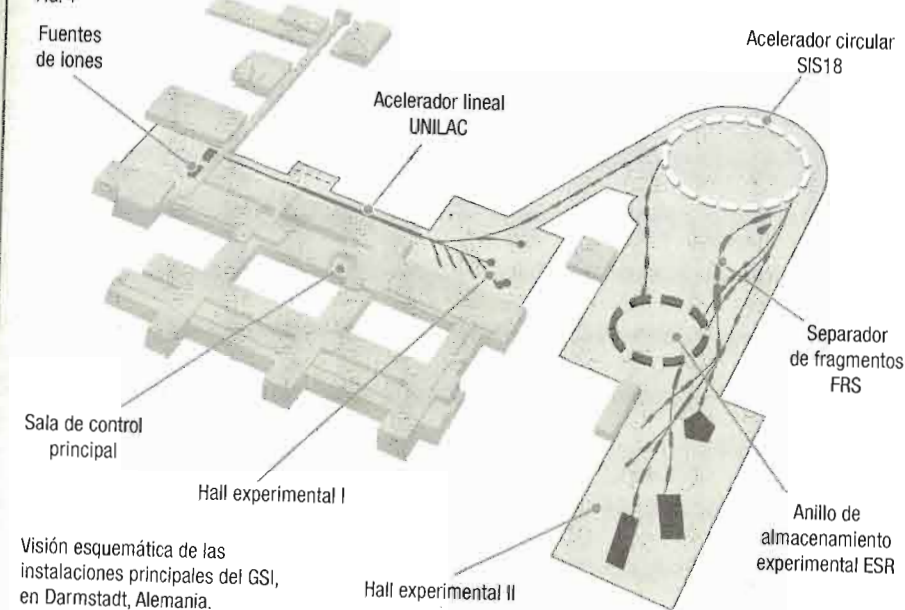
El sistema de aceleradores del Fermilab se denomina Tevatrón e incluye varios aceleradores conectados en cascada. Un preacelerador de tipo Cockcroft-Walton genera protones que se introducen en un acelerador lineal que los acelera hasta los 200 MeV de energía. Seguidamente se inyectan en un *anillo intensificador* o *booster* que incrementa la energía del haz con cada revolución hasta que alcanza los 8 GeV, momento en el que es introducido en el *inyector principal*, otro anillo en el que los protones se aceleran hasta los 200 GeV. Finalmente, la energía del haz resultante se incrementa en el *doblador de energía*, un sincrotrón de 6,9 km

de circunferencia, que puede acelerar los protones hasta 1 TeV. El haz final se puede hacer chocar contra blancos fijos de diferentes materiales o bien es posible producir colisiones protón-antiprotón con antiprotones que circulan por el propio sincrotrón en sentido contrario. En este último caso se alcanzan energías de colisión de hasta 2 TeV.

En el Fermilab hay dos experimentos que se desarrollan en paralelo y que permiten comprobar los resultados obtenidos. Se denominan CDF y DZero y gracias a ellos se han realizado importantes descubrimientos. Así, en 1977 se logró encontrar el quark *bottom*. En 1995, los experimentos realizados a energías de 1,8 TeV permitieron descubrir el quark *top*. Finalmente, en 2000 se obtuvo la primera evidencia directa del neutrino del tau (neutrino tauónico).

Las instalaciones del GSI (figura 4) están dedicadas al estudio de las propiedades de la materia, tanto de los átomos como de

FIG. 4



los núcleos, aunque se desarrollan paralelamente experimentos en las áreas de física de los materiales, física de plasmas, biofísica y medicina nuclear. Iones de muy diversos elementos son inyectados en el acelerador lineal UNILAC, de 120 m de longitud, en el que son acelerados hasta alcanzar velocidades del 20% de la de la luz. Estos iones acelerados pueden emplearse directamente en distintos experimentos, que se realizan en el hall I, o bien inyectarse en el anillo acelerador SIS18. Se trata de un sincrotrón de 216 m de circunferencia que permite aumentar la velocidad de los iones hasta unos 270 000 km/s. Los iones acelerados pueden almacenarse en el anillo ESR para posteriores experimentos o hacerse colisionar con distintos blancos para producir isótopos exóticos que pueden aislarse con el separador de fragmentos FRS para realizar estudios específicos con ellos.

Entre los más importantes descubrimientos realizados en el GSI está la síntesis de seis de los elementos más pesados de la tabla periódica (véase la tabla). Otro de los hallazgos ha permitido desarrollar estrategias de tratamiento del cáncer con iones pesados (hadroterapia), fundamentalmente de carbono.

Número atómico	Símbolo químico	Nombre	Fecha de descubrimiento	Origen del nombre
107	Bh	Bohrio	24/02/1981	Niels H.D. Bohr (físico danés)
108	Hs	Hassio	14/03/1984	Hesse (estado alemán en el que se encuentra el GSI)
109	Mt	Meitnerio	29/08/1982	Lise Meitner (física austriaca)
110	Ds	Darmstadtio	09/11/1994	Darmstadt (ciudad alemana en la que se encuentra el GSI)
111	Rg	Roentgenio	08/12/1994	Wilhelm C. Röntgen (físico alemán)
112	Cn	Copernicio	09/02/1996	Nicolás Copérnico (astrónomo prusiano, hoy polaco)

Elementos pesados descubiertos en el GSI (Darmstadt, Alemania).

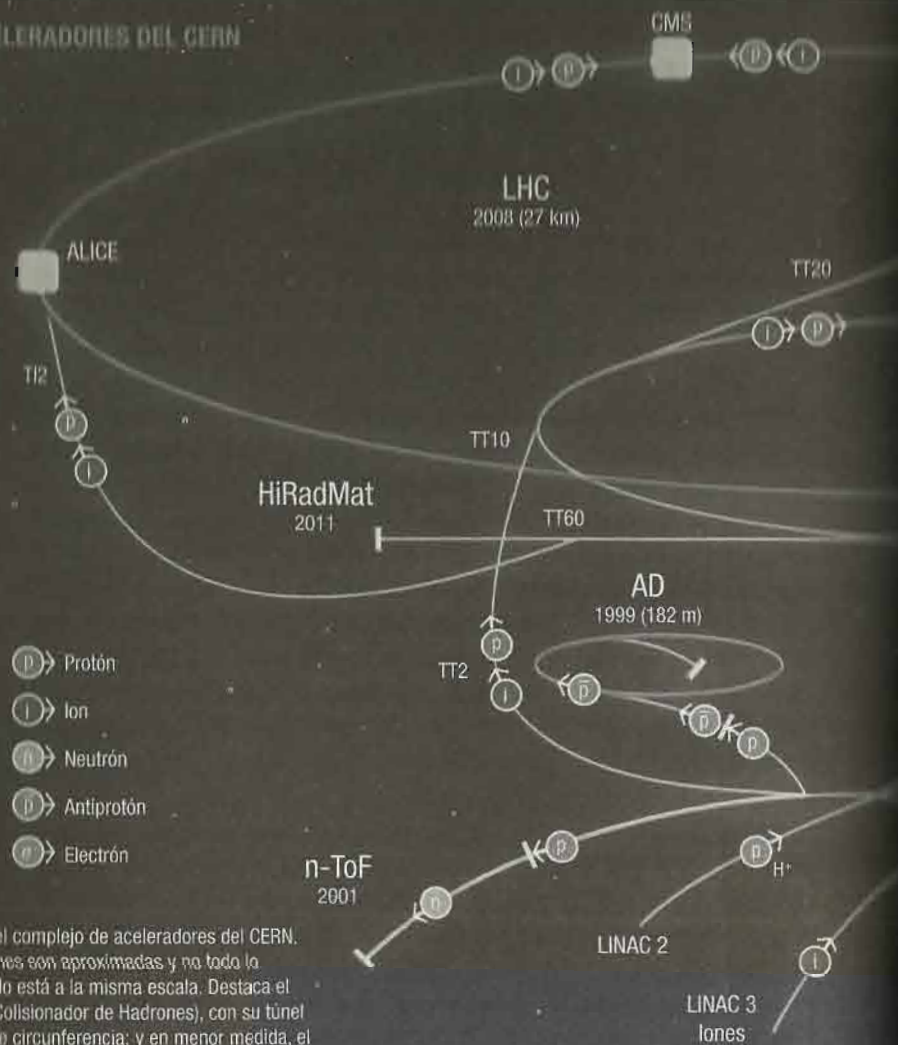
EL GRAN COLISIONADOR DE HADRONES

El Consejo Europeo para la Investigación Nuclear, el CERN, fue creado en 1952 bajo los auspicios de la UNESCO y el decidido empuje de muchos físicos de prestigio entre los que cabe mencionar a Bohr, al italiano Edoardo Amaldi y al francés Pierre V. Auger. Un año después, en la sesión del Consejo celebrada en París, doce países firmaron la convención que establecía la Organización Europea para la Investigación Nuclear y disolvía el propio Consejo, si bien mantuvo el acrónimo. La nueva organización inició oficialmente sus trabajos en septiembre de 1954.

El primer acelerador del CERN (véase la imagen de las páginas siguientes) fue un sincrociclotrón de protones de 600 MeV de energía que se construyó en 1957. Estuvo en funcionamiento durante treinta y tres años y desde 1967 se dedicó en exclusiva a suministrar haces para ISOLDE, un separador de masas en línea dedicado al estudio de isótopos inestables. Dos años más tarde entró en funcionamiento el sincrotrón de protones (PS). Alcanzó energías de hasta 28 GeV y durante más de diez años constituyó el centro de los experimentos de física de partículas realizados en el CERN. En 1965 un equipo de investigadores liderado por el italiano Antonino Zichichi pudo observar por vez primera un núcleo de antimateria, concretamente un antideuterón, compuesto por un antiprotón y un antineutrón.

En 1976 operó por primera vez el Supersincrotrón de Protones (SPS), capaz de generar haces de protones de hasta 450 GeV. Años más tarde, el SPS pudo producir colisiones protón-antiprotón incorporando una técnica inventada por el neerlandés Simon van der Meer: el *enfriamiento estocástico*. Este procedimiento permitía generar haces de antiprotones con suficiente intensidad y había sido probado en un acelerador denominado *Anillos de Almacenamiento Intersecantes*, el primer colisionador de hadrones construido en el mundo. En el SPS, el italiano Carlo Rubbia y sus colaboradores descubrieron en 1983 los bosones W^\pm y Z^0 . Rubbia y Van der Meer compartieron al año siguiente el premio Nobel de Física por este descubrimiento.

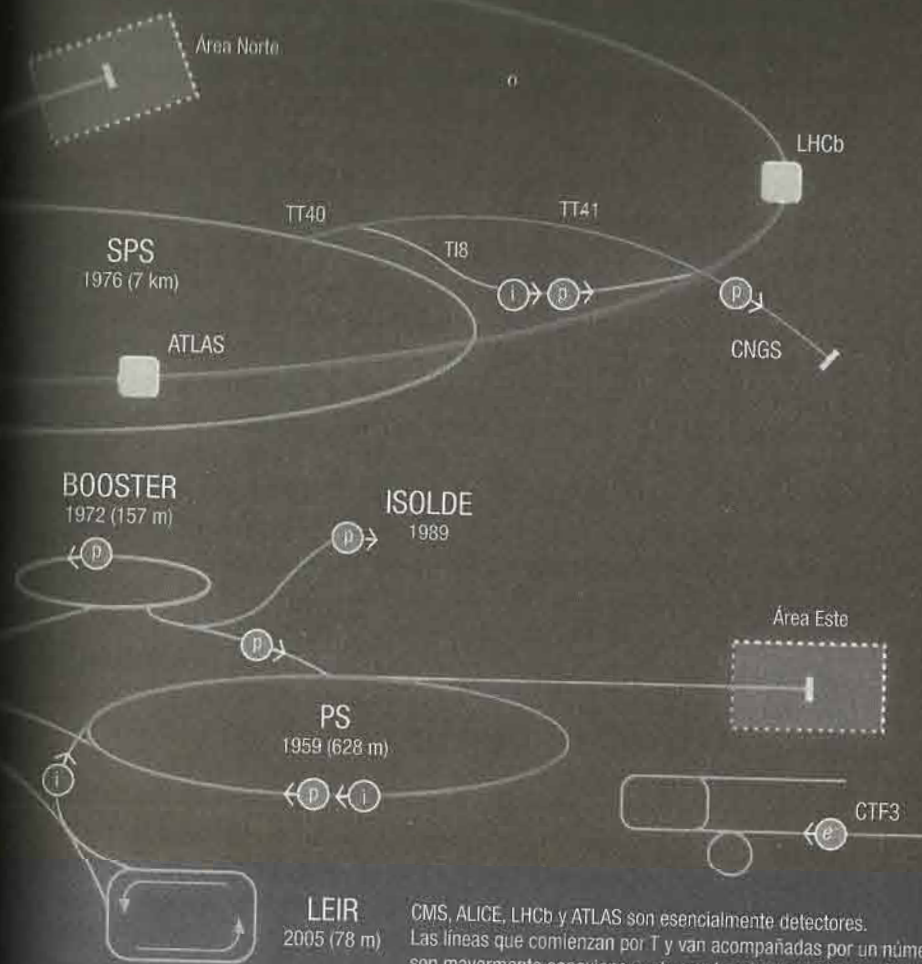
LOS ACCELERADORES DEL CERN



Esquema del complejo de aceleradores del CERN.

Las posiciones son aproximadas y no toda la representación está a la misma escala. Destaca el LHC (Gran Colisionador de Hadrones), con su túnel de 27 km de circunferencia; y en menor medida, el SPS (Supersincrotrón de Protones), con el suyo de 7 km. Otras de las instalaciones importantes son:

PS (Sincrotrón de Protones), AD (Desacelerador de Antiprotones), CTF3 (Instalación de Test del Colisionador Lineal Compacto), ISOLDE (Dispositivo Separador de Isótopos en Línea), LEIR (Anillo para Iones de Baja Energía), LINAC (Acelerador Lineal), n-ToF (una fuente de neutrones diseñada para estudiar interacciones de neutrones con núcleos), HiRadMat (usado para poner a prueba muestras de materiales y componentes de aceleradores sometiéndolos a pulsos de alta radiación) y BOOSTER (acelera protones provenientes del LINAC 2 antes de inyectarlos en el PS).



El complejo del CNGS, en el que se han venido realizando experimentos de envío de neutrones al Laboratorio Nacional del Gran Sasso en Italia, a 730 km del CERN, acoge un nuevo experimento, AWAKE, dedicado a ensayar un revolucionario método de aceleración de partículas basado en el plasma. Este método promete acelerar partículas hasta energías mucho más altas que las alcanzables con aceleradores clásicos a igual tamaño.

En febrero de 1988 se acabó de construir el túnel de 27 km de circunferencia que iba a albergar el Gran Colisionador de electrones y positrones, el LEP, que entró en funcionamiento al año siguiente, llegando a alcanzar energías superiores a los 200 GeV. Los experimentos realizados durante su periodo de operaciones permitieron investigar en profundidad las características de la interacción electrodébil. En noviembre de 2000 fue clausurado para comenzar la construcción del Gran Colisionador de Hadrones, el LHC, que se ubicaría en el mismo túnel que el LEP.

El 10 de septiembre de 2008, el primer haz de protones recorrió el LHC con éxito. El acelerador había costado al CERN un total de 3000 millones de euros más otros 1000 millones en sistemas de detección y computación. El LHC está diseñado para acelerar dos haces de partículas idénticas, simultáneamente y en sentido contrario, con la idea de hacerlos colisionar en varios puntos específicos. En el caso de los protones, estos son inyectados en el *intensificador* (BOOSTER), entrando con una energía de 50 MeV procedentes del LINAC 2 y saliendo con 1,4 GeV. Tras ingresar en el sincrotrón PS alcanzan 25 GeV y, seguidamente, son acelerados en el Supersincrotrón de Protones (SPS) hasta los 450 GeV. Por último, se inyectan en el LHC, en ambos sentidos, hasta alcanzar los 7 TeV de energía, lo que requiere unos 20 minutos. En el caso de los protones, la energía de colisión es, por tanto, de unos 14 TeV. También es posible acelerar iones pesados de manera similar. Por ejemplo, si se utilizan haces de plomo, la energía de colisión llega hasta valores por encima de los 1000 TeV.

El LHC está compuesto por 8 *arcos* y 8 *inserciones*, permitiendo que los haces sigan trayectorias casi circulares. En los arcos se disponen los imanes dipolares que desvían las partículas cargadas para que sigan los caminos requeridos. Las inserciones son secciones lineales con una región de transición en cada extremo. La máquina incluye más de 9500 imanes de los cuales más de 1200 son dipolos y casi 400 son cuadrupolos. El diseño y la construcción de los dipolos, de 15 m de longitud y alrededor de 35 toneladas de peso cada uno, han constituido algunos de los desafíos tecnológicos más importantes. Se trata de electroimanes superconductores capaces de proporcionar un campo magnético de 8,3 T (teslas) y

que necesitan operar a 1,9 K, una temperatura que se alcanza bombeando helio superfluido en el sistema de imanes. El helio superfluido se caracteriza por no tener viscosidad, lo que ocurre cuando se encuentra a una temperatura por debajo de 2,17 K, siendo, por tanto, un excelente refrigerante. Cada uno de los dos haces es acelerado mediante ocho cavidades superconductoras que proporcionan la potencia de radiofrecuencia necesaria. Estas cavidades trabajan a 4,5 K y generan un campo acelerador de 5 MV/m.

En los aceleradores como el LHC, los haces de partículas se disponen en paquetes bien definidos que aprovechan para su aceleración el hecho de que esta se produce a partir de un campo de radiofrecuencia. El paquete debe circular por la cavidad aceleradora cuando el campo está orientado de manera adecuada para producir la aceleración. Los haces de protones del LHC se componen de 2800 paquetes, cada uno de los cuales contiene del orden de 10^{11} partículas. Mientras circulan por el anillo, los paquetes tienen unos pocos centímetros de longitud y un milímetro de sección transversal, pero cuando se aproximan al punto de colisión se comprimen hasta alcanzar una dimensión de 16 micras, lo que incrementa la probabilidad de que se produzcan colisiones protón-protón al cruzarse con el segundo haz. A pesar de ello, solo se consiguen del orden de unas 20 colisiones cada vez que los haces se cruzan, pero como esto ocurre unos 30 millones de veces cada segundo la tasa de colisión del LHC es de unos 600 millones por segundo.

El costo anual de funcionamiento del LHC es de unos 20 millones de euros. La potencia eléctrica consumida es de 120 MW, más de la mitad de toda la del CERN. El consumo de energía anual se estima en alrededor de 800 000 MWh. En cualquier caso, ese consumo es similar al del SPS, a pesar de tratarse de una máquina mucho más grande y que opera a más altas energías. Ello se debe a la tecnología de imanes superconductores utilizada.

Pero ¿cuáles fueron las razones de este esfuerzo científico y tecnológico sin precedentes? Una de ellas es estudiar la masa de las partículas y, más concretamente, responder a preguntas tales como: ¿por qué algunas partículas tienen masa y otras no?, ¿por qué unas partículas tienen más masa que otras? Y esas preguntas

LA INTERACCIÓN FUERTE

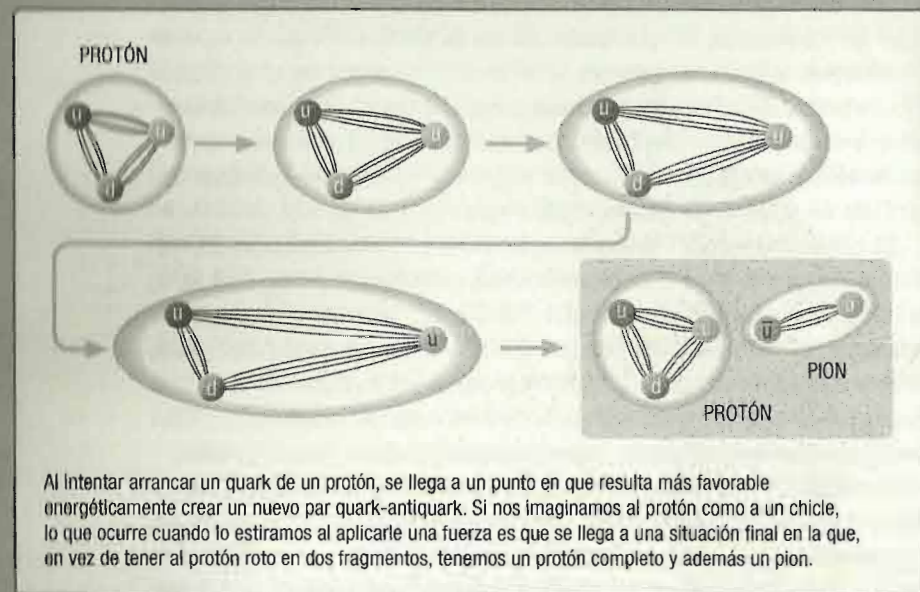
El corto alcance de la interacción débil nos da una indicación de que sus bosones intermediarios deben tener masa, y esa es una de las razones por las que se introdujo el campo de Higgs. En principio, podríamos esgrimir el mismo argumento con la interacción fuerte entre los quarks y sus bosones mediadores, los gluones. Sin embargo, éstos no tienen masa y ello se debe a las particularidades de la fuerza que actúa entre los quarks y que se conoce también como *interacción de color*.

La libertad asintótica de los quarks

La primera característica de esa interacción es la *libertad asintótica*: cuando los quarks se encuentran a cortas distancias, la interacción entre ellos es prácticamente nula, es decir, que si un conjunto de quarks (dos como ocurre en los mesones o tres en los bariones) se encuentran muy próximos entre sí, actúan casi como partículas libres. Esta propiedad fue «descubierta» en 1973 por David Gross y Frank Wilczek y, de forma independiente, por David Politzer, los tres estadounidenses, lo que les valió el premio Nobel de Física en 2004.

Los quarks no pueden aislarse

La segunda propiedad importante de la interacción de color es que crece indefinidamente a medida que los quarks que interactúan se separan más y más. Si intentamos separar un quark de un protón estamos obligados a ejercer una fuerza creciente para lograrlo, y llega un mo-



mento en que es energéticamente más favorable crear un nuevo par quark-antiquark. El nuevo quark será atraído por los otros dos quarks del protón, que volverá a su estructura inicial, y el antiquark se unirá al quark que tratamos de separar constituyendo un pión (véase la figura). Por tanto, en el proceso de separación de un quark de un protón terminamos con un estado final que contiene una partícula compuesta adicional, el pión, y la masa de este más la del protón es obviamente mayor que la del protón inicial. Esto explica también el hecho de que no es posible tener quarks individuales aislados.

El efecto banda elástica

Por tanto, la interacción fuerte se comporta de manera bien distinta a las otras interacciones, que se hacen cada vez menos intensas a medida que la distancia entre las partículas interactuantes aumenta. Pero no es esta la única diferencia. Los fotones, los mediadores de la interacción electromagnética, no tienen carga y, por consiguiente, no interactúan entre ellos mediante esa interacción. Sin embargo, los gluones sí que tienen «carga de color» y, por tanto, se atraen unos a otros mediante la interacción fuerte. Todo funciona como si al tratar de separar dos quarks se formase entre ambos una especie de «banda elástica», compuesta de gluones que interactúan unos con otros, y que se opone a esa separación con mayor intensidad a medida que crece la distancia entre ellos. Esa es la razón por la que la interacción fuerte entre los quarks es de corto alcance, independientemente de que los gluones carezcan de masa.



Frank Wilczek, uno de los descubridores de la libertad asintótica de los quarks, dando una conferencia en el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT). Tal descubrimiento le reportó en 2004 el Nobel de Física, que compartió con David Gross y David Politzer.

nos llevan de vuelta al modelo estándar y a una de las partículas que lo conforman: el *bosón de Higgs*.

A principios de la década de 1960, las teorías imperantes que permitían describir las interacciones fundamentales establecían

A pesar de mi rechazo a las exageraciones, el LHC pertenece a un mundo que solo puede describirse con términos superlativos.

LISA RANDALL

que los bosones intermediarios no debían tener masa para que se pudieran verificar las simetrías básicas de las propias interacciones. En el caso de la interacción electrodébil, esto era así para el fotón, pero no para los bosones W^\pm y Z^0 . En 1964 se publicaron en *Physical Review Letters* tres artículos que proponían, de forma

independiente, un mecanismo capaz de dar cuenta de esta situación. Por un lado los belgas Robert Brout y François B. Englert, por otro los estadounidenses Gerald S. Guralnik y Carl R. Hagen junto con el británico Thomas W.B. Kibble, y por último el británico Peter W. Higgs, desarrollaron una teoría basada en un campo que ocuparía todo el espacio de forma tal que cuanto más interactuara con él una partícula más masa adquiriría.

Posteriormente se entendió que el mecanismo podía extenderse al resto de las partículas con masa y permitió cerrar el modelo estándar que, como ya hemos indicado, ha podido establecer predicciones de una precisión más que notable. En este sentido se puede mencionar como ejemplo que las masas predichas por el modelo para las partículas W^\pm y Z^0 eran de 80,390(18) y 91,1874(21) GeV/ c^2 , respectivamente, mientras que los valores medidos fueron 80,387(19) y 91,1876(21) GeV/ c^2 .

¿Cómo demostrar la existencia real de este curioso campo de fuerza? La única forma era encontrar la partícula mediadora de la correspondiente interacción. La partícula terminó conociéndose como bosón de Higgs, al igual que se bautizó con el mismo nombre al campo de fuerza correspondiente. Sin embargo, de acuerdo a las condiciones establecidas en la teoría, esa partícula sería muy difícil de producir y tendría una vida media extremadamente pequeña, del orden de 10^{-22} s. Como consecuencia hubo que esperar muchos años hasta conseguir la tecnología

necesaria para ello y, como ya hemos adelantado antes, una de las razones de la construcción del LHC fue precisamente la búsqueda del bosón de Higgs.

En diciembre de 2011, las colaboraciones de los experimentos ATLAS y CMS del LHC presentaron resultados en los que restringían la masa del bosón de Higgs en el caso de que existiera: 116-130 GeV/ c^2 y 115-127 GeV/ c^2 , respectivamente. Al mismo tiempo, los datos obtenidos en ambos experimentos mostraban indicios, no definitivos, en las respectivas regiones de energía. Un año más tarde, el 4 de julio de 2012, ambos experimentos mostraron evidencias definitivas de una partícula con una masa de 125-126 GeV/ c^2 y cuyas características eran compatibles con las del bosón de Higgs. Al año siguiente Higgs y Englert compartieron el premio Nobel de Física.

LOS EXPERIMENTOS DEL LHC

El LHC continúa estudiando distintos aspectos relacionados con la materia, sus componentes y las interacciones entre ellos. De hecho, son siete los experimentos que se desarrollan en el LHC. Además de ATLAS y CMS, ya mencionados, están ALICE, LHCb, LHCf, MOEDAL y TOTEM.

Los detectores de ATLAS y CMS son de propósito general. Ambos tienen los mismos objetivos en lo que a la física a estudiar se refiere, pero los diseños y soluciones técnicas son diferentes. El detector de ATLAS es un sistema magnético con forma de toro constituido por 8 bobinas superconductoras dispuestas alrededor del tubo del haz formando un cilindro de 46 m de longitud, 25 m de diámetro y 7000 toneladas. CMS tiene la forma de una bobina cilíndrica de cable superconductor de 21 m de longitud y 15 de diámetro. Su peso total es de 12500 toneladas y produce campos magnéticos de 4 T. Alrededor de 2000 personas de más de 30 países trabajan en cada una de las dos colaboraciones.

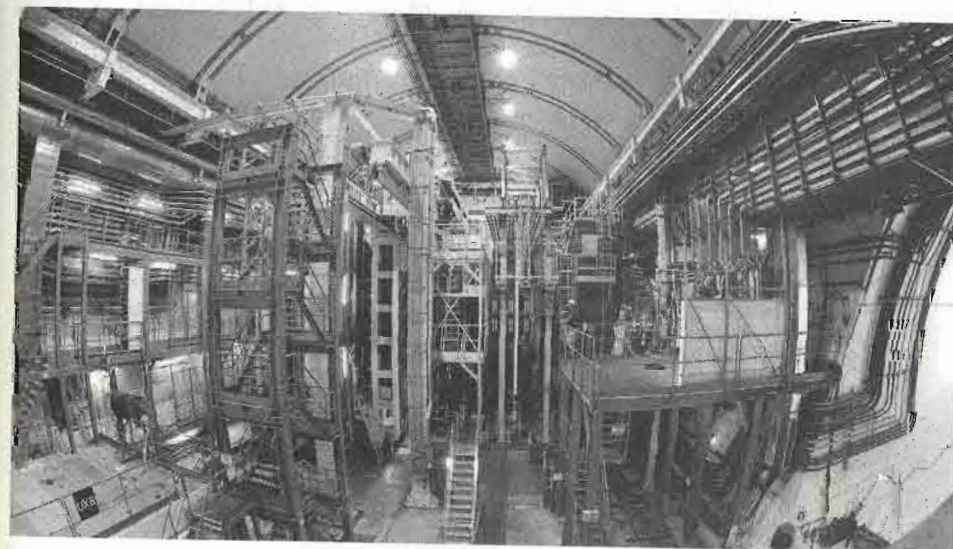
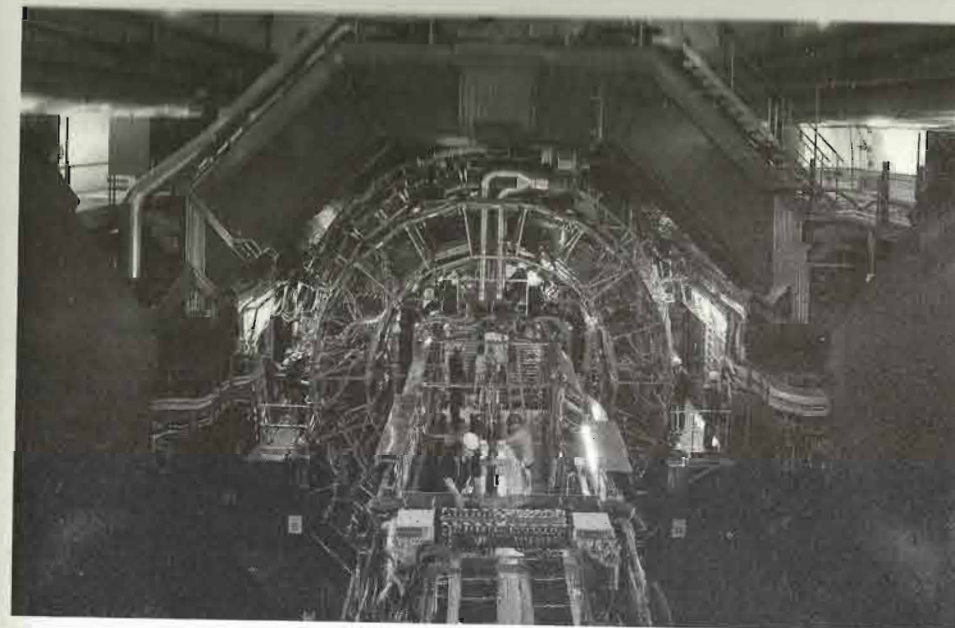
ALICE (véase la fotografía superior de la pág. 113) es un experimento dedicado al estudio de las colisiones entre iones de plomo y en él se intenta estudiar las propiedades del denomina-

do *plasma de quarks y gluones*. Se trata de alcanzar una situación de muy alta temperatura y densidad en la que los quarks y gluones dejen de estar confinados en los hadrones, recreando un estado de la materia que podría haber existido inmediatamente después de producirse el Big Bang y antes de que los protones, los neutrones y otros hadrones empezaran a formarse. Más de 1500 miembros de más de 30 países forman esta colaboración.

LHCb (véase la imagen inferior de la página contigua) está diseñado para detectar un conjunto de partículas que se denominan mesones B y que se caracterizan por tener entre sus quarks constituyentes el *bottom* y/o el antiquark correspondiente. Estas partículas, cuando se producen, siguen trayectorias de salida cuyas direcciones están cercanas a la del haz y por ello este detector está formado por varios elementos orientados principalmente en esa dirección, cubriendo una distancia hacia delante de unos 20 m. Sus dimensiones son $21 \times 13 \times 10$ m y su peso es de 5600 toneladas. En la colaboración participan más de 600 investigadores de 15 países.

Desde principios de la década de 2000 se habían venido produciendo observaciones de estados exóticos de quarks formados por cuatro de estas partículas (*tetraquarks*). Experimentos realizados en diversos laboratorios habían permitido observar posibles tetraquarks, pero no fue hasta 2013 cuando de manera independiente los equipos de los experimentos Belle (Japón) y BESIII (China) anunciaron el descubrimiento de $Z_c(3900)$, el primer tetraquark confirmado, y en 2014 fue en el LHCb donde se encontró otra de estas partículas: la $Z(4430)$. El año siguiente, en julio de 2015, fue observado en este experimento un nuevo estado de agregación de los quarks, un *pentaquark*, formado por 4 quarks y 1 antiquark. El estudio de las propiedades de estos agregados abre una nueva vía para entender cómo está formada la materia.

Los tres experimentos restantes del LHC (LHCf, MOEDAL y TOTEM) son pequeños experimentos dedicados a investigaciones muy concretas. El LHCf es un intento de usar las partículas producidas en dirección hacia delante tras la colisión para simular los rayos cósmicos en condiciones controladas de laboratorio, obteniendo información útil para interpretar las cascadas de



Arriba, el experimento ALICE en febrero de 2012. Abajo, el LHCb en agosto de 2008, cuando solo estaba a un mes de ser plenamente operativo para comenzar a recopilar datos. Ambos siguen aportando resultados de gran importancia para el avance de la física, figurando en ese sentido entre los experimentos más productivos del CERN.

partículas provocadas por los rayos cósmicos en su interacción con las capas altas de la atmósfera. Este experimento consta de dos detectores de 30 cm de longitud, 80 cm de altura y 10 cm de anchura (de apenas 40 kg cada uno), situados a ambos lados del ATLAS, a unos 150 m de distancia.

MOEDAL tiene como objetivo primario detectar los monopolos magnéticos, que son partículas elementales predichas en algunas teorías (como la teoría de supercuerdas) y aún no encontradas experimentalmente, y se caracterizan por ser imanes aislados con un único polo. El detector está formado por mil láminas de detectores de trazas nucleares que cubren 250 m² de superficie y está situado en la misma región de colisión que LHCb.

Finalmente, TOTEM está dedicado a estudiar la física de los protones que emergen tras las colisiones del LHC con ángulos de dispersión muy pequeños, una región que no es accesible para el resto de detectores. Se trata de un conjunto de detectores situados a lo largo de 500 m alrededor del punto de colisión de CMS. Esta situación permite llevar a cabo análisis combinados de los resultados de ambos experimentos con una notable ganancia en precisión.

Los experimentos del LHC van a abrir nuevas líneas de investigación en relación con los problemas que el modelo estándar no puede explicar por el momento.

¿MÁS ALLÁ DEL MODELO ESTÁNDAR?

Como ha ocurrido muchas veces en el pasado, las teorías físicas se han mantenido vigentes mientras las nuevas observaciones experimentales no han puesto en tela de juicio sus predicciones. El modelo estándar es por el momento la mejor de las teorías disponibles para explicar cuáles son los constituyentes subatómicos de la materia y cómo interactúan entre ellos. Sin embargo, existen ya algunos problemas que exigirán más pronto que tarde su modificación cuando no su sustitución por otra teoría más correcta.

Ya hemos dicho antes que la interacción gravitatoria no se incluye en el modelo. El gravitón no ha sido aún descubierto y no está claro si los nuevos resultados experimentales que puedan

obtenerse al respecto en un futuro podrán aportar la información necesaria para formular una nueva *teoría del todo*. ¿Serán en este sentido relevantes las ondas gravitatorias recientemente descubiertas? ¿Podrá salvarse la inconsistencia existente entre el modelo estándar y la teoría de la relatividad general?

Otro problema abierto es el de la asimetría existente entre materia y antimateria en el universo visible. En los primeros estadios del universo la situación debió ser prácticamente simétrica, sin que haya ningún indicio acerca de una posible desproporción entre ambas. El modelo estándar no contempla ningún mecanismo que permita producir la asimetría observada. ¿Podría dar el bosón de Higgs una explicación de esta asimetría como proponen algunos investigadores?

Los experimentos de oscilación de neutrinos han demostrado sin lugar a dudas que estas partículas han de tener masa, en contra de lo que asume el modelo estándar. La solución de este problema se ha intentado introduciendo a mano los términos de masa necesarios, pero ese procedimiento conlleva otros problemas de tipo teórico que quedarían pendientes. ¿Será posible diseñar un mecanismo de adquisición de masa por parte de los neutrinos similar al que dota de masa al resto de partículas?

Y relacionado con las observaciones cosmológicas encontramos el problema de la materia y la energía oscuras. En la actualidad se sabe que la materia observada solo representa cerca de un 5% de la composición total (materia y energía) del universo. El resto de este estaría integrado aproximadamente por un 26% de materia oscura y un 69% de energía oscura. La materia oscura se comportaría como la materia conocida desde el punto de vista gravitatorio. De hecho son sus efectos de interacción con otros cuerpos masivos los que han permitido tener conocimiento de ella. Sin embargo, su interacción con los campos de fuerza del modelo estándar es, en el mejor de los casos, muy débil y el modelo no ha podido definir aún buenos candidatos de partículas constituyentes de la misma. La energía oscura es aún más desconocida hasta el momento.

Todo parece indicar que queda aún un largo trecho por recorrer.

Partículas fantasmagóricas

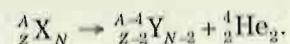
Desde su descubrimiento, los neutrinos han supuesto un continuo objeto de interés para los físicos. Sus elusivas propiedades y sus conexiones con algunos de los problemas aún abiertos en astrofísica, cosmología y física de partículas hacen de ellos un caso de estudio que aún parece lejos de ser completado.

Desde que fueran sugeridos teóricamente, la historia de los neutrinos está plagada de hechos sorprendentes, incluso antes de que se descubrieran en el laboratorio. Sus características son tales que cuando aún no habían llevado a cabo su primera aparición en la película de la física subatómica, físicos del prestigio de Niels Bohr afirmaron que en el caso de la desintegración β (beta), el proceso nuclear cuya explicación dio pie a la propuesta de estas partículas, no se verificaba la conservación de la energía. Que una cuestión de esta envergadura fuera siquiera considerada por los «desesperados» investigadores de la época refuerza el halo de misterio que siempre ha acompañado a estas elusivas partículas.

En 1930, Wolfgang E. Pauli, un físico austriaco posteriormente nacionalizado estadounidense, «inventó» el neutrino para explicar la información experimental obtenida de la desintegración β de varios radioisótopos conocidos. Más concretamente, postuló su existencia porque era la única solución razonable para garantizar que esos procesos de desintegración cumplieran con el principio fundamental de conservación de la energía.

Para entender la situación es interesante comparar lo que sucede en la desintegración α (alfa) con la información que se

obtiene en el caso de la desintegración β . Si se mide el espectro energético de las partículas α provenientes de una muestra que contenga radioisótopos emisores α , nos encontramos con situaciones como la que se esquematiza en la figura 1. La reacción de desintegración α es la siguiente:



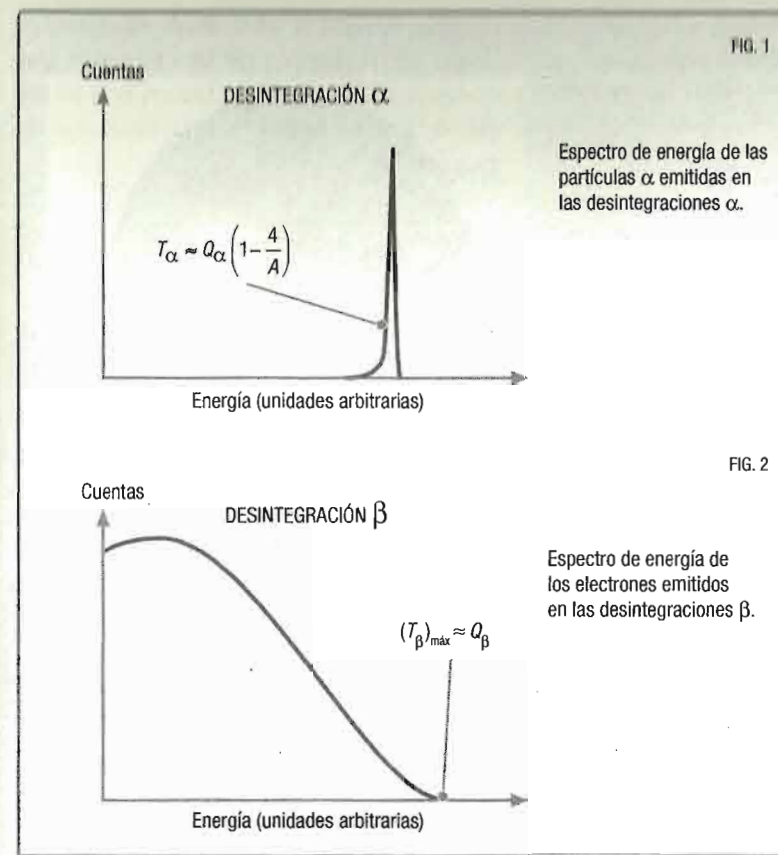
Como vemos, un núcleo X, con Z protones y N neutrones, emite una partícula α , que no es sino un núcleo de He, con dos protones y dos neutrones. Como resultado, el núcleo se convierte en otro, Y, que tiene dos protones y dos neutrones menos. En la nomenclatura nuclear, A representa el número de nucleones, es decir, el número total de protones y neutrones. Si, como en cualquier otro proceso físico, consideramos la conservación de la energía y del momento en la reacción, es posible determinar la energía cinética que llevará la partícula α emitida después de producirse cada desintegración:

$$T_\alpha = \frac{Q_\alpha}{1 + \frac{m_\alpha}{m_Y}} \approx Q_\alpha \left(1 - \frac{4}{A}\right),$$

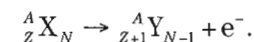
donde

$$Q_\alpha = m({}^A_ZX_N)c^2 - m({}^{A-4}_{Z-2}Y_{N-2})c^2 - m_\alpha c^2$$

es el valor Q de la reacción al que ya nos hemos referido anteriormente (véase la pág. 20) y que nos indica las condiciones energéticas bajo las cuales puede tener lugar la desintegración: esta ocurrirá si $Q_\alpha > 0$, pero si no es así, es decir, si $Q_\alpha \leq 0$, será necesario un aporte externo de energía para que la reacción se produzca. Volviendo a las partículas α emitidas por los distintos núcleos presentes en la muestra radiactiva, todas llevarán la energía cinética concreta T_α que hemos indicado antes, y de ahí el espectro que se observa, con un pico bien definido, en la figura 1.



En el caso de la desintegración β , la reacción inicialmente considerada era la siguiente:



Lo que se suponía que ocurría era que un neutrón del núcleo padre se transformaba en un protón, el núcleo hijo quedaba con un protón más y un neutrón menos que el padre y se emitía un electrón, resultando una reacción formalmente muy parecida a la correspondiente a la desintegración α . Cuando se calculaba

WOLFGANG PAULI

Wolfgang E. Pauli nació el 26 de abril de 1900 en Viena. Obtuvo su doctorado en la Universidad Ludwig-Maximilian de Múnich, bajo la dirección de Arnold J.W. Sommerfeld en 1921, con un trabajo sobre la teoría cuántica del ion molecular de hidrógeno, H_2^+ . Ese mismo año, y a petición de Sommerfeld, escribió un tratado de más de 200 páginas sobre la teoría de la relatividad que aún hoy sigue considerándose como una referencia básica en el tema. En los años siguientes trabajó con Max Born en Gotinga y con Bohr en Copenhague y entre 1923 y 1928 impartió clases en la Universidad de Hamburgo. Fue precisamente durante este período cuando dio a luz su bien conocido *principio de exclusión*, amén de contribuir de manera notable en numerosos aspectos de la teoría cuántica, entonces en pleno desarrollo. Así, por ejemplo, en 1924 propuso la existencia de un nuevo número cuántico, con dos posibles valores, para el electrón, número cuántico que posteriormente se denominó *espín*. En 1928 obtuvo una plaza en el Instituto de Tecnología de Zúrich, donde permaneció hasta 1940, fecha en la que emigró a Estados Unidos, donde fue contratado como profesor en el Instituto de Estudios Avanzados de Princeton. Obtuvo la ciudadanía suiza en 1949, una vez que regresó a Zúrich, donde vivió hasta su fallecimiento, ocurrido el 16 de diciembre de 1958.

Una personalidad particular

Al parecer, adquirió una merecida y divertida fama de «gafe» hacia los dispositivos experimentales, dado que estos presentaban una inexplicable tendencia a descomponerse en su presencia. Por otra parte, se mostraba especialmente severo con aquellos trabajos académicos que en su opinión no podían analizarse mediante los procedimientos científicos usuales, y se cuenta que en una ocasión dijo de un artículo de estas características: «¡Ni siquiera está equivocado!».



Esta foto de Pauli fue tomada en 1940 para el pasaporte con el que viajó a Estados Unidos ese mismo año.

la energía cinética del electrón emitido, sumando de nuevo la conservación de la energía y el momento, se obtenía que

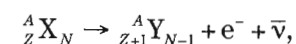
$$T_{\beta} = \frac{Q_{\beta}}{1 + \frac{m_e}{m_Y}} \approx Q_{\beta}$$

ya que la masa del electrón, m_e , es mucho menor que la del núcleo hijo, m_Y . Ahora el Q de la reacción venía dado por

$$Q_{\beta} = m\left({}_Z^AX_N\right)c^2 - m\left({}_{Z+1}^AY_{N-1}\right)c^2 - m_e c^2.$$

Sin embargo, cuando el físico inglés James Chadwick midió por primera vez el espectro de los electrones emitidos por una muestra radiactiva de un radioisótopo β , encontró un resultado similar al que se muestra en la figura 2 que, como vemos, es muy distinto del correspondiente a la desintegración α (figura 1): en lugar de aparecer un pico bien definido a la energía T_{β} indicada, resultaba un espectro continuo cuya máxima energía es precisamente Q_{β} .

Fue en este contexto en el que Bohr y otros aventuraron la posibilidad de que la desintegración β podría no respetar la conservación de la energía en cada desintegración individual ocurrida en la muestra radiactiva, aunque sí que lo haría desde un punto de vista «estadístico», es decir, cuando se consideraban globalmente todos esos procesos de desintegración individuales que ocurrían en la muestra. Pauli, por el contrario, creía que la energía debía conservarse en cada una de las desintegraciones individuales de manera estricta. Y para poner de acuerdo esta hipótesis fundamental con los resultados experimentales de Chadwick, abogó por una solución extremadamente simple (aunque también notablemente arriesgada): que en realidad la desintegración β responde a la siguiente ecuación:

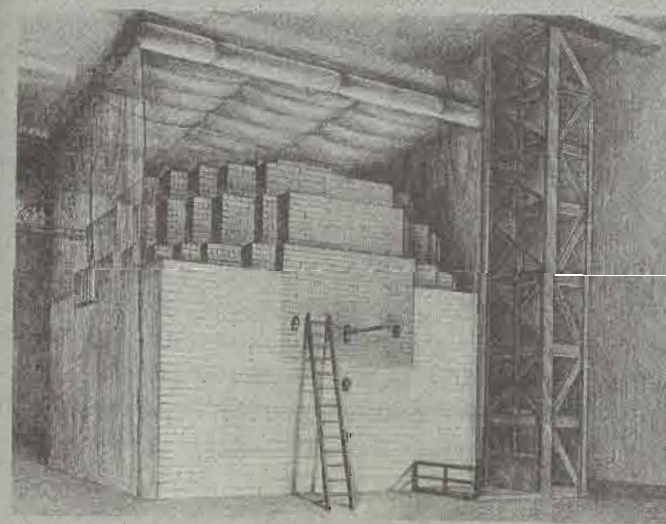
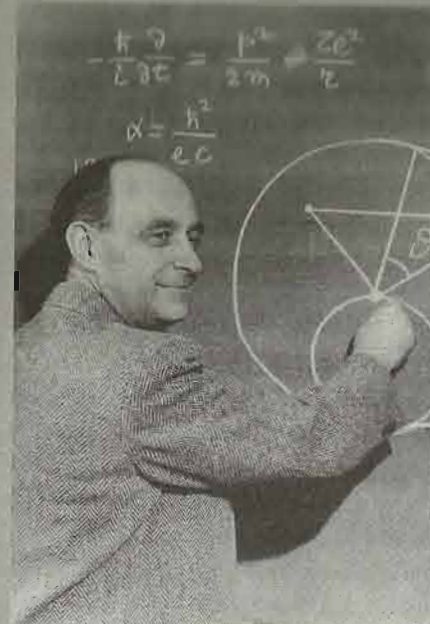


ENRICO FERMI Y EL PRIMER REACTOR DE FISIÓN

Enrico Fermi nació en Roma el 29 de septiembre de 1901 y se mostró interesado en la física desde su infancia, primero con su hermano Giulio, que falleció en 1915, y después con Enrico Persico, un colega de escuela. En 1918 ingresó en la Escuela Normal Superior de Pisa, donde destacó desde el principio por su buen rendimiento académico. No era extraño que el director del laboratorio de física, Luigi Puccianti, le pidiera que ilustrara a sus compañeros sobre física cuántica, física atómica, relatividad, etc. En 1922 obtuvo la *Laurea* en física con una tesis titulada «Un teorema de cálculo de probabilidad y algunas de sus aplicaciones». Tras trabajar con Born en Gotinga y con Ehrenfest en Leiden, donde tuvo la oportunidad de conocer a algunos de los físicos más importantes del momento, como Heisenberg, Jordan, Lorentz y Einstein, impartió clases de física matemática y mecánica teórica en la Universidad de Florencia. En 1926 obtuvo la plaza de profesor de física teórica de la Universidad de La Sapienza, en Roma, donde organizó en torno suyo a un grupo de físicos excepcionales, entre ellos Emilio Segrè, Ettore Majorana, Edoardo Amaldi y Bruno Pontecorvo y que en 1934 produjeron radiactividad inducida por el bombardeo con neutrones en una veintena de elementos diferentes. Bombardeando torio y uranio creyeron haber encontrado dos nuevos elementos, a los que llamaron *ausonio* y *esperio*, que corresponderían a los actuales neptunio y plutonio, pero en realidad habían logrado fisiónar los núcleos blanco utilizados.

Clave en el desarrollo de la energía nuclear

Hubo que esperar, sin embargo, hasta que Lise Meitner y Otto Frisch dieran la interpretación correcta del proceso físico, después de analizar el experimento realizado por Otto Hahn y Fritz Straßmann bombardeando uranio con neutrones. Fermi, en la Universidad de Columbia desde principios de 1939, supo del hallazgo a través de Willis Lamb, que había asistido a una conferencia de Bohr en la que este discutió los resultados mencionados. Casi inmediatamente, se llevó a cabo el primer experimento de fisión nuclear en Estados Unidos. Tras comprobar que en la fisión se producían neutrones adicionales, Fermi y Leó Szilárd trabajaron en un diseño de reactor nuclear, pero por distintas razones no fue hasta 1942, con Fermi ya en la Universidad de Chicago, cuando se construyó. La *Chicago Pile-1* se empezó a montar el 6 de noviembre de 1942 y el reactor alcanzó la *críticidad* (es decir, la situación en que la reacción en cadena se automantiene) el 2 de diciembre de aquel mismo año. Fermi siguió colaborando en la construcción y explotación de distintos reactores nucleares y hacia mediados de 1944, Robert Oppenheimer, entonces director científico del Proyecto Manhattan, lo convenció para que fuera a Los Alamos, donde actuó como director asociado del laboratorio. A partir de 1945 trabajó como profesor de física en la Universidad de Chicago y como investigador experimental en el Laboratorio Nacional de Argonne, además de pertenecer a varios comités asesores. Se opuso por razones morales y técnicas al desarrollo de la bomba de hidrógeno. Durante sus últimos años de vida investigó sobre las propiedades de los piones y de los muones. Murió el 28 de noviembre de 1954. Entre la infinidad de premios y menciones que recibió cabe destacar el premio Nobel de Física en 1938 «por sus demostraciones sobre la existencia de nuevos elementos radiactivos producidos por la irradiación de neutrones y por su descubrimiento relacionado con las reacciones nucleares producidas por neutrones lentos». El elemento de número atómico 100 lleva el nombre de *fermio* en su honor.



La foto superior izquierda, tomada alrededor de 1950, muestra a Fermi explicando un problema de física (nótese la errata en la definición de la constante alfa). En la foto superior derecha se le ve recibiendo el premio Nobel de Física en 1938 de manos del rey Gustavo V de Suecia. La imagen inferior muestra la *Chicago Pile-1*, el primer reactor de fisión nuclear en lograr una reacción en cadena automantenida, máquina en cuyo diseño trabajó Fermi.

es decir, que no solo se emite el electrón, sino que hay una segunda partícula que no se detecta y que se reparte con aquella energía total disponible Q_β . Como la carga eléctrica debía conservarse en la reacción, la nueva partícula no debía tener

carga alguna y Pauli la llamó «neutrón» en una carta publicada en 1930 y durante su primera visita a Estados Unidos, al año siguiente. Sin embargo, no publicó su primer trabajo sobre su teoría hasta la Conferencia Solvay celebrada en Bruselas en 1933. Para entonces la partí-

A lo más que podemos aspirar la mayoría de nosotros en física es, simplemente, a malinterpretar a un nivel más profundo.

WOLFGANG PAULI

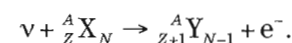
cula fantasmagórica ya había cambiado de nombre, ya que el físico italiano Enrico Fermi la había rebautizado en 1932 con el de *neutrino*, diferenciándola así del *neutrón*, la partícula que actualmente conocemos como tal y que había descubierto Chadwick aquel mismo año. En esa conferencia ya se tenía una imagen del neutrino que respondía a una partícula que, además de ser neutra, no debía de tener prácticamente ninguna masa. Por otro lado quedó definitivamente descartada la hipótesis de Bohr sobre la no conservación de la energía en las desintegraciones β individuales.

Basándose en la hipótesis de Pauli, Fermi desarrolló la teoría de la desintegración β y pudo dar cuenta tanto del proceso β^- , el conocido entonces, como del β^+ , un proceso de desintegración similar al anterior pero en el que un protón del núcleo se convierte en un neutrón, emitiéndose un positrón (la antipartícula del electrón) y un neutrino. Fueron los físicos y químicos franceses Frédéric Joliot e Irène Joliot-Curie quienes en 1934 descubrieron este segundo tipo de proceso β estudiando las desintegraciones que seguían al bombardeo de núcleos de aluminio con partículas α . El excelente acuerdo que las predicciones de la teoría de Fermi mostraban con los resultados experimentales eliminó cualquier duda que pudiera quedar sobre la realidad de la existencia de los neutrinos y de su «responsabilidad» en la conservación de la energía en cada desintegración β individual.

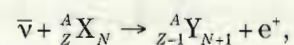
EL DESCUBRIMIENTO DEL NEUTRINO

Sin embargo, la detección directa de los neutrinos no parecía entonces una tarea factible. De hecho, justo después de que en 1934 Fermi publicara un artículo en la revista *Nuovo Cimento*, titulado «Intento de una teoría de los rayos beta», los físicos Hans A. Bethe y Rudolf E. Peierls calcularon la probabilidad de que los neutrinos interactuaran con la materia. Pero su conclusión fue desoladora y el propio Bethe anunció: «a efectos prácticos, resulta imposible detectar el neutrino». El artículo de Fermi estaba escrito en italiano y unos meses después fue publicado por *Zeitschrift für Physik* en alemán. La revista *Nature* había rehusado hacerlo argumentando que se trataba de un trabajo demasiado especulativo. Aunque, con posterioridad, los editores de *Nature* lamentaron mucho su decisión, la anécdota nos da una idea de cuál era el estado de la situación.

A pesar de todo, en física, como en casi todas las disciplinas científicas, basta que algo sea declarado como «imposible» para que haya alguien que se sienta acuciado y estruje todas las posibilidades razonables, y en ocasiones no tanto, para abordarlo. Este caso no fue diferente y algunos físicos, bien es verdad que no muchos, se mantuvieron activos en la búsqueda directa del neutrino. Entre ellos destacó en un principio un italiano que había sido estudiante de Fermi en Roma y que luego había llevado a cabo una larga peregrinación por varios centros de investigación en Francia, Estados Unidos, Reino Unido y, finalmente, Rusia: Bruno Pontecorvo. No había nada erróneo en los cálculos de Bethe y Peierls, pero lo que demostraban con ellos era que la probabilidad de que un neutrino interactuara con la materia era extremadamente pequeña, aunque no estrictamente nula. Los neutrinos recorrían por norma general grandísimas distancias en medios materiales sin sufrir ninguna colisión, pero de tanto en tanto uno de ellos podía ser dispersado por algún núcleo siguiendo la reacción siguiente:



Pontecorvo sugirió en 1946 disponer un gran tanque lleno con un compuesto que contuviese cloro, un elemento relativamente barato, junto a una fuente generadora de gran cantidad de neutrinos, como por ejemplo un reactor nuclear, y analizar los núcleos resultantes que, en ese caso, serían de argón. El argón, como gas noble que es, no interactuaría químicamente con otros compuestos y, además, era radiactivo con una vida media suficientemente larga como para permitir su detección y conteo y demostrar, por consiguiente, la existencia del neutrino. Se trataba simplemente de intentar hacer que un número ingente de neutrinos atravesara una gran cantidad de masa para que el número de interacciones alcanzara un valor significativo en un tiempo razonable. La idea permaneció aparcada hasta que un químico estadounidense, Raymond Davis, la rescató alrededor de 1953. Lo intentó dos veces, aumentando en la segunda el volumen del tanque detector y situándolo junto a un reactor mucho más potente, con lo que incrementó el número de neutrinos incidentes. Sin embargo, en ambos casos no encontró diferencias en la tasa de núcleos de argón creados cuando el reactor estaba funcionando o se encontraba en parada. Este resultado negativo fue, no obstante, el germen de una serie de investigaciones que le valieron el premio Nobel en 2002 junto con el japonés Masatoshi Koshihara y el italoestadounidense Riccardo Giacconi, por sus trabajos sobre los rayos cósmicos. Lo que había observado en sus experimentos fallidos, entonces sin saberlo a ciencia cierta, era la interacción de los neutrinos cósmicos con su gran detector. El problema era que los radioisótopos más abundantes producidos en las reacciones de fisión eran del tipo β^- y que en las subsiguientes desintegraciones se producían antineutrinos y no neutrinos como en un principio se había supuesto. La reacción de los antineutrinos con los núcleos del detector era de la forma



y, en lugar de formarse argón, el núcleo hijo sería de azufre, elemento que no era el que Davis buscaba.

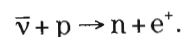
LA AGITADA Y POLÉMICA VIDA DE BRUNO PONTECORVO

Bruno Pontecorvo nació en 1913 en Marina di Pisa (Italia). Era el cuarto de ocho hermanos. Aunque estudió inicialmente Ingeniería en la Universidad de Pisa, en 1931 decidió cambiar a la física y se marchó a la Universidad de Roma, donde fue admitido en el grupo de estudiantes que Fermi había ido formando desde su llegada a esa universidad. En 1934 participó en los experimentos de bombardeo neutrónico que llevaron al descubrimiento de la fisión nuclear. A partir de febrero de 1936 trabajó en París, en el laboratorio del matrimonio Joliot-Curie, sobre las colisiones neutrón-protón, y estudió las transiciones que se presentan en los *isómeros* (estados excitados metaestables de los núcleos atómicos con vidas medias muy superiores a las de los estados vecinos). Justo un día antes de que los alemanes entraran en París en 1940, él, acompañado por un hermano y unos amigos, escapó hacia Estados Unidos. En 1941 desarrolló un dispositivo basado en el bombardeo con neutrones lentos que fue usado en edafología para identificación de los tipos de suelos. Ya en 1943 se trasladó a Canadá, donde trabajó para *Tube Alloys*, nombre clave con el que era conocido un proyecto británico secreto para desarrollar armamento nuclear. En Montreal, Pontecorvo participó en el diseño y construcción de un reactor nuclear de agua pesada y, simultáneamente, investigó la radiación cósmica, los muones y, sobre todo, los neutrinos, campo en el que llegó a ser uno de los mejores especialistas del mundo. Nacionalizado británico en 1948, retornó al Reino Unido al año siguiente, donde trabajó hasta 1950 en proyectos relacionados con el desarrollo de reactores nucleares. En septiembre de ese año desertó a la Unión Soviética, donde permaneció hasta su muerte en 1993. Allí trabajó en el Instituto de Investigación Nuclear de Dubna. A pesar de que había sido recibido como un héroe y de que obtuvo innumerables condecoraciones del régimen soviético, no fue autorizado a salir del país hasta 1978.



Pontecorvo (a la izquierda) con Enrico Fermi, en una fotografía tomada hacia 1950, en los últimos años de vida de Fermi. Esta época culminó con la súbita marcha de Pontecorvo a la Unión Soviética, donde estableció su residencia y lugar de trabajo, una decisión por la que fue muy criticado.

En 1956, Clyde L. Cowan y Frederick Reines realizaron un experimento en el que pusieron de manifiesto sin ningún género de dudas la existencia de los antineutrinos. Por este experimento a Reines le fue concedido, en 1995, el premio Nobel, que compartió con Martin L. Perl, descubridor del leptón tau a mediados de la década de 1970. Cowan había fallecido en 1974 y no pudo por tanto ser galardonado. El experimento de Cowan y Reines de 1956 era la repetición de otro que habían llevado a cabo, a menor escala, un par de años antes. En un principio pensaron que la mejor fuente de neutrinos que podían tener era una explosión nuclear y, al parecer, el proyecto llegó a ser aprobado, pero finalmente optaron por usar un reactor. Este segundo experimento lo llevaron a cabo en la misma instalación donde Davis había hecho el suyo: el reactor de Savannah River. Sin embargo, su detector era diferente. Incluía, por un lado, dos tanques de unos 200 l de capacidad, llenos con CdCl_2 disuelto en agua, y, por otro y rodeando a los dos tanques, un detector de centelleo formado por tres láminas de material centelleador y más de 100 tubos fotomultiplicadores. La secuencia de las reacciones que se esperaba que ocurrieran era la siguiente. En primer lugar, los antineutrinos emitidos por el reactor interactuarían con los protones del agua:



Seguidamente, los positrones se aniquilarían con los electrones del medio dando lugar a la señal característica de este tipo de proceso: dos fotones emitidos en la misma dirección y sentidos contrarios y con una energía bien definida de 0,511 MeV. Estos fotones serían detectados con el detector de centelleo. Por su parte, los neutrones seguirían la reacción:



es decir, que serían absorbidos por el cadmio, que pasaría a convertirse en otro isótopo de ese mismo elemento pero excitado,

el cual finalmente perdería su energía de excitación emitiendo un fotón. Este fotón sería detectado también por el detector de centelleo, pero un cierto tiempo después, unos 5 μs , de la primera señal, la correspondiente a la aniquilación positrón-electrón. Esta vez no hubo dudas y tras comprobar inequívocamente que la cadencia de señales esperadas en el detector de centelleo aumentaba significativamente cuando el reactor estaba operativo, Cowan y Reines enviaron un telegrama a Pauli anunciándole el descubrimiento. Era el 14 de junio de 1956 y habían pasado pues más de veinticinco años desde su predicción.

EL PROBLEMA DE LOS NEUTRINOS SOLARES

A partir de su asistencia a la Cuarta Conferencia de Física Teórica celebrada en Washington en 1938, Bethe estudió los ciclos de producción de energía en las estrellas. Junto a Critchfield analizó el que desde entonces se denominó ciclo p-p y, posteriormente, descubrió un segundo ciclo, el C-N-O. En 1939, publicó en *Physical Review* un artículo titulado «Producción de energía en estrellas» en el que estableció los detalles de ambos ciclos que, por otro lado, no son más que sendos conjuntos de reacciones nucleares de fusión que concluyen con la producción de ${}^4\text{He}$ y la emisión de fotones, positrones y neutrinos.

Davis se percató de que el Sol podría ser una excelente fuente de neutrinos, mucho más práctica que los reactores nucleares. Pero para realizar cualquier experimento y poder extraer conclusiones cuantitativas del mismo era fundamental conocer con la máxima precisión posible cuál era el flujo de neutrinos emitidos por el Sol. Desde que Bethe había hecho sus cálculos no se habían realizado progresos significativos en ese sentido, pero a principios de la década de 1960 apareció en escena un físico teórico estadounidense que cambió la situación drásticamente: John N. Bahcall. Tras entrar en contacto con Davis, ambos se embarcaron en el experimento *Homestake*, que tomaba su nombre de la mina de Dakota del Sur en la que se llevó a cabo. Se trataba de detectar neutrinos solares y para ello utilizaron

como detector un depósito de unos 380 m³ de percloroetileno (C₂Cl₄) que montaron a 1500 m de profundidad. El proyecto estaba financiado por el Laboratorio Nacional de Brookhaven y sus resultados dieron lugar a uno de los «enigmas» científicos que más resonancia mediática tuvo hasta que empezó a entreverse su solución treinta años más tarde. Los cálculos de Bahcall, en los que había ido incorporando todos los procesos que previsiblemente podrían tener una cierta incidencia, incluso los de importancia baja, predecían una tasa de detección de neutrinos de unos 10 por semana. La recolección de datos se inició en otoño de 1966 y en 1968 se hicieron públicos los primeros resultados: los neutrinos solares se habían detectado sin duda alguna, pero 2/3 de los predichos por los cálculos de Bahcall no habían «llegado» a la Tierra. Una nueva «misteriosa desaparición» ligada a los elusivos neutrinos. Durante los siguientes años se mejoraron los sistemas de detección y contaje, así como los cálculos de las tasas de emisión, mejorando la descripción de los procesos involucrados, pero el factor de neutrinos perdidos se mantuvo pertinaz: el *problema de los neutrinos solares* estaba servido.

Y entonces apareció de nuevo Pontecorvo, que se preocupó de un rompecabezas experimental que acabaría dando la solución a este problema. En 1936, analizando las cascadas de partículas producidas por la interacción de los rayos cósmicos con las capas altas de la atmósfera terrestre, Anderson y Neddermeyer habían descubierto el muon, un «electrón pesado», con doscientas veces más masa que el electrón y que al principio era entendido como un estado excitado de este. Así, cabía esperar que el muon perdería el «exceso de energía» dando lugar a un electrón y a radiación electromagnética, de manera similar a lo que ocurría con los átomos o los núcleos excitados. Al tratarse de una reacción con dos cuerpos en el estado final, ambos deberían tener energías bien definidas; sin embargo, los resultados experimentales mostraban que esto no era así. La situación era muy similar a la que dio lugar a la propuesta del neutrino por Pauli, y Fermi, junto con un estudiante de doctorado suyo, Hans J. Steinberger, formularon la reacción que debía tener lugar:

$$\mu^- \rightarrow e^- + \nu + \bar{\nu}$$

En 1948 Steinberger llevó a cabo experimentos que permitieron confirmar esa predicción. Sin embargo, se generó un nuevo problema: ¿por qué el neutrino y el antineutrino no se aniquilaban dando lugar a radiación electromagnética tal y como sucedía con otros pares partícula-antipartícula? En 1959, Pontecorvo sugirió que, tal vez, esas dos partículas no fueran realmente un neutrino y su antineutrino, sino que igual que el muon y el electrón eran partículas diferentes, también podrían serlo los neutrinos emitidos en los procesos de desintegración en los que ambos se vieran involucrados. Desde años antes se conocía la necesidad de la conservación del denominado *número leptónico* en las reacciones subatómicas. Este número leptónico se determinaba asignando el valor +1 a los leptones y -1 a los antileptones. En la reacción anterior vemos que efectivamente se conserva esa cantidad: a la izquierda tenemos +1 para el μ^- , mientras que a la derecha tenemos +1 para el e^- y el ν y -1 para el $\bar{\nu}$. La hipótesis de Pontecorvo significaba no solo que pudieran existir distintos tipos de neutrinos, sino que debía conservarse el número leptónico por familias, es decir, el electrónico y el muónico, separadamente. La reacción de desintegración del muon debía ser por tanto la siguiente:

$$\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e$$

Y para verificar su tesis, el propio Pontecorvo propuso un experimento que llevaron a cabo Leon M. Lederman, Melvin Schwartz y el propio Steinberger durante los primeros años de la década de 1960. La idea era generar piones, que son partículas con espín 0, que pueden ser neutros o cargados (positiva o negativamente) y cuyas masas son 134,98 y 139,57 MeV/c², respectivamente. Para ello hicieron incidir un haz de protones de 15 GeV de energía, producido en el acelerador del Laboratorio Nacional de Brookhaven, contra un blanco de berilio. Los piones, producidos en can-

tidades importantes, son partículas inestables que se desintegran produciendo muones y neutrinos de muon. Los primeros se absorbían interponiendo una pared de acero con un espesor de más de 10 m, mientras que los segundos, que atravesaban esa barrera sin problemas, colisionaban con un blanco compuesto por varias toneladas de aluminio. La mayor parte de los neutrinos de muon también pasaban de largo en el blanco pero algunos interactuaron con los núcleos de aluminio produciendo los leptones cargados de su familia, en este caso muones. Todas las señales detectadas en el experimento correspondieron a la creación de muones, lo que, por un lado, permitió descubrir el neutrino del muon y, por otro, en consecuencia, demostrar la predicción de Pontecorvo sobre la existencia de distintos tipos de neutrinos. Corría el año 1962 y por este descubrimiento, Lederman, Schwartz y Steinberger recibieron el premio Nobel en 1988.

En 1969, un año después de que los desconcertantes resultados de Davis y Bahcall fueran hechos públicos, Pontecorvo y Vladimir Gribov publicaron un artículo en *Physics Letters* en el que mostraron cómo era posible lo que desde entonces se denominó *oscilaciones* de los neutrinos, es decir, que los neutrinos podían cambiar de «familia» mientras se desplazaban. Pontecorvo ya había coqueteado con esa idea diez años antes e incluso en un trabajo suyo, publicado en una revista soviética en 1967, mencionó, en relación con esas oscilaciones: «Desde un punto de vista observacional el objeto ideal es el Sol [...] El único efecto sobre la superficie de la Tierra consistiría en que el flujo observable de neutrinos solares sería dos veces menor que el flujo total de neutrinos». O sea que se anticipó a los resultados del experimento de Davis y Bahcall. Sin embargo, casi nadie se hizo eco de ello y el problema de los neutrinos solares siguió sin resolverse.

SUPER-K

Kamioka es el nombre de una antigua ciudad japonesa que en 2004 se constituyó, junto a Furukawa y otras poblaciones más pequeñas, en la ciudad de Hida. En Kamioka se encuentra la mina

DETECTORES CHERENKOV

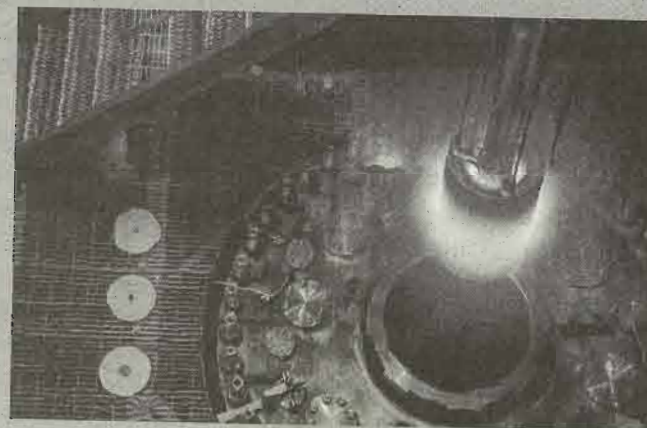
Un detector Cherenkov es un detector basado en el efecto del mismo nombre que fue descubierto por Pável A. Cherenkov en 1934, cuando trabajaba como investigador en el Instituto de Física Lóbedev, en Moscú, bajo la dirección de Serguéi I. Vavílov. Cherenkov observó la emisión de una radiación de tono azulado que emergía de una botella de agua sometida a irradiación. Illá M. Frank e Igor Y. Tamm colaboraron en la explicación del fenómeno y compartieron con Cherenkov el premio Nobel de Física en 1958.

La onda de choque azulada

La radiación Cherenkov se produce cuando una partícula cargada se desplaza por un material con una velocidad mayor que la de la luz en ese material. Se trata de un efecto similar al estallido sónico que produce un avión cuando supera la barrera del sonido, esto es, cuando viaja a mayor velocidad que la del sonido en el aire. La partícula cargada perturba el campo electromagnético local del medio y la perturbación se desplaza con la velocidad de la luz en el medio. Como la partícula se mueve a mayor velocidad, la perturbación queda en su estela y es emitida como una onda de choque cuyas componentes de frecuencia principales se encuentran en el ultravioleta. En la zona visible la intensidad relativa por unidad de frecuencia es proporcional a la frecuencia y de ahí el tono azulado con el que se observa.

Diversas aplicaciones

Los usos de los detectores Cherenkov son múltiples. Se han podido determinar las características de los rayos cósmicos a partir de las señales que producen las partículas energéticas generadas por ellos en su interacción con la alta atmósfera. Los detectores Super-K y SNO utilizados para demostrar las oscilaciones de neutrinos utilizaban la radiación Cherenkov para identificar el tipo de neutrinos detectados. También se han usado en física de partículas, y se han montado detectores Cherenkov en el experimento ALICE del LHC en el CERN.



El resplandor que baña esta escena se debe a la radiación de Cherenkov. La foto se tomó en julio de 2015 durante una operación rutinaria de repostaje de combustible nuclear en el reactor nuclear HFIR del Laboratorio Nacional estadounidense de Oak Ridge (ORNL).

Mozumi, donde en 1982 comenzó sus actividades el Observatorio Kamioka del Instituto para la Investigación de los Rayos Cósmicos de Japón. El primer detector empezó a trabajar en 1983. Se trataba de Kamiokande (KamiokaNDE; NDE es el acrónimo en inglés de Experimento de Desintegración de Nucleones), un detector cilíndrico de 16 m de altura y otro tanto de diámetro, que contenía 3000 toneladas de agua pura, rodeado de alrededor de 1000 tubos fotomultiplicadores, con el que se pretendía medir la vida media del protón utilizando la técnica de *radiación Cherenkov*. El detector estaba enterrado a 1000 m de profundidad para reducir el ruido de fondo creado por los neutrinos producidos al interactuar los rayos cósmicos con la alta atmósfera. A pesar de que ese ruido se reducía en varios órdenes de magnitud respecto al que se observaría en la superficie terrestre con el mismo detector, no fue posible utilizarlo para su objetivo inicial, a saber, estudiar la potencial desintegración del protón.

Sin embargo, los científicos que trabajaban en la instalación entendieron enseguida que tenían entre manos un dispositivo excepcional para detectar neutrinos: aquellos que, mientras atravesaban el tanque de agua, colisionaran con un electrón, transferirían a este energía suficiente para producir la radiación Cherenkov necesaria para poder contabilizar y analizar el evento. Además, era posible discernir la dirección de procedencia de los neutrinos, su energía, el instante en el que se había producido la interacción, etc. Kamiokande estuvo operativo hasta 1995 y permitió corroborar los resultados que Davis y Bahcall habían obtenido: solo la mitad de los neutrinos solares que deberían haber alcanzado la Tierra llegaban efectivamente a ella. También fue posible establecer que el número de neutrinos detectados disminuía al aumentar su energía, un hecho que Bahcall había predicho en sus cálculos y que hasta entonces no había podido comprobarse.

Contemporáneamente con Kamiokande, se desarrollaron dos experimentos más relacionados con la detección de neutrinos solares. Entre 1991 y 1997 mantuvo su actividad GALLEX (acrónimo de *Gallium Experiment*), un experimento conceptualmente idéntico al de Davis y Bahcall pero en el que el material utili-

zado en el detector fue una solución de $\text{HCl} + \text{Ga}_3\text{Cl}_8$. La idea era hacer uso de la reacción



que tenía una ventaja respecto de la reacción con cloro que usaron Davis y Bahcall: su umbral energético es de unos 200 keV y el espectro de los neutrinos que podían detectarse se ampliaba enormemente hacia las bajas energías, abriendo la posibilidad de detectar los neutrinos provenientes del ciclo p-p estelar. El detector de 54 m³ de volumen y 100 toneladas de solución se construyó en el Laboratorio Nacional del Gran Sasso (Italia), a una profundidad de 3000 m bajo el monte Gran Sasso. El germanio producido era extraído y, dado que se trata de un radioisótopo con una vida media de 11,43 días, era sencillo determinar el número de neutrinos incidentes a partir de la actividad del germanio medida. Recuérdese que la actividad es el número de desintegraciones por unidad de tiempo que sufre una muestra radiactiva y que es proporcional, por tanto, a la concentración de radioisótopo presente en la misma. Pero como en el caso del experimento de Davis y Bahcall y del Kamiokande, el déficit de neutrinos solares seguía presente. A GALLEX le sucedió GNO (*Gallium Neutrino Observatory*), que incrementó el contenido de galio del detector en un factor 3 y que estuvo operativo hasta 2004, mejorando la precisión de su antecesor, pero sin que se modificaran las conclusiones alcanzadas. Y tampoco se obtuvieron resultados distintos en el SAGE (*Soviet-American Gallium Experiment*), que dispuso un detector de 50 toneladas de galio metálico líquido bajo tierra en el Observatorio de Neutrinos de Baksan (BNO), en el Cáucaso. Operativo hasta 2007 y basándose en la misma reacción que GALLEX, sus resultados mostraron que la tasa de neutrinos detectados frente a la que predecía la teoría alcanzaba, como máximo, un 60%.

Cuatro experimentos diferentes denotaban, por tanto, la misma deficiencia. Los resultados del experimento de Davis y Bahcall parecían correctos. ¿Eran entonces incorrectos los cálculos de Bahcall o es que el neutrino hacía gala de alguna de sus ex-

trañas propiedades? En este estado de cosas se construyó un detector colosal: el Super-K (SuperKamiokande), que se encuentra en la misma ubicación que Kamiokande. Se trata de un cilindro de acero de 41,4 m de altura y 39,3 m de diámetro que contiene 50 000 toneladas de agua ultrapura y que está dividido en dos partes: una interna, cuyas dimensiones son 36,2 m de altura y 33,8 m de diámetro, y otra externa, que corresponde al resto del volumen del cilindro contenedor. La separación entre ambas partes se lleva a cabo mediante una superestructura, también de acero, en la que se insertan 11 129 tubos fotomultiplicadores que apuntan a la parte interna del detector y 1885, más pequeños, que están orientados hacia la parte externa. Ambas partes están ópticamente separadas mediante una barrera de fibras de polietileno de alta densidad. Con estas características, el detector permitía discernir la dirección de procedencia de los neutrinos y su familia con una notable precisión.

Con el Super-K se pretendía resolver el problema de los neutrinos solares y también otro que se puso de manifiesto ya con Kamiokande: la anomalía de los neutrinos atmosféricos. Estos son los neutrinos que se generan en la desintegración de los piones y muones formados por la interacción de los rayos cósmicos con la atmósfera. Debido a su mecanismo de producción, estos neutrinos inciden en la superficie terrestre siguiendo cualquier dirección, con energías mucho más altas que los solares y en una proporción que se estableció teóricamente que debía ser de dos neutrinos de muon por cada neutrino de electrón. Los resultados de Kamiokande mostraron que el número de neutrinos de ambos tipos era esencialmente el mismo. E idénticos resultados arrojó otro detector del mismo tipo que estaba operativo desde 1982 en una mina a orillas del lago Erie, en Estados Unidos: el IMB (por las siglas de Irvine-Michigan-Brookhaven), que era un cubo de unos 15 m de lado, 3 300 toneladas de agua y 2 048 tubos fotomultiplicadores.

Los primeros resultados del Super-K vieron la luz en 1998 y mostraron una curiosa asimetría. Como era posible discernir entre los neutrinos atmosféricos que habían incidido en el detector desde «arriba», es decir, directamente desde la atmósfera, de

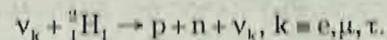
aquellos que habían entrado en el mismo por «debajo», esto es, después de atravesar todo el volumen terrestre, se pudo comparar el número de neutrinos de muon con el de neutrinos de electrón en ambas situaciones y resultó que mientras que en el primer caso la razón era de 2 a 1, como se había predicho, en el segundo había el mismo número de neutrinos de las dos familias. Y, además, el número de neutrinos de electrón no variaba con la dirección de incidencia. Es decir, que los neutrinos de muon, en su viaje a través de la Tierra hasta Super-K, desaparecían o, como había indicado en su momento Pontecorvo, oscilaban transformándose en neutrinos de otra familia que no eran detectados.

Desde 1975 los experimentos del equipo dirigido por Martin L. Perl, realizados en el colisionador de electrones y positrones de Stanford (Estados Unidos), habían puesto de manifiesto la existencia del leptón tau. Y era evidente, a la vista de lo que ocurría con los otros dos leptones (muon y electrón), que debería existir el correspondiente neutrino del tau que fue descubierto por la colaboración DONUT del Fermilab en 2000. Parecía pues que los resultados del Super-K podrían considerarse como una verificación de las oscilaciones de los neutrinos.

Sin embargo, la confirmación definitiva no llegó hasta que a principios de la década de 2000 empezó a producir datos un nuevo experimento, el SNO (*Sudbury Neutrino Observatory*), una instalación situada en Sudbury (Canadá), en una mina a 2 100 m de profundidad (véase la imagen de la pág. 141). El detector estaba formado por una esfera de material acrílico de 6 m de radio que contenía 1 000 toneladas de agua pesada (agua en cuyas moléculas hay átomos de deuterio, cuyo núcleo está formado por un protón y un neutrón, en lugar de los de hidrógeno usuales, que solo tienen un protón en el núcleo) y que estaba rodeada por una estructura esférica de 8,5 m de radio, que servía de soporte a más de 9 000 tubos fotomultiplicadores. Una cavidad externa llena de agua contenía el detector, que se encontraba flotando en ella, y proporcionaba apantallamiento frente a la radiación. El uso de agua pesada había sido sugerido por Herbert H. Chen, quien señaló que de esa manera el detector podría ser sensible a dos reacciones distintas, a saber:



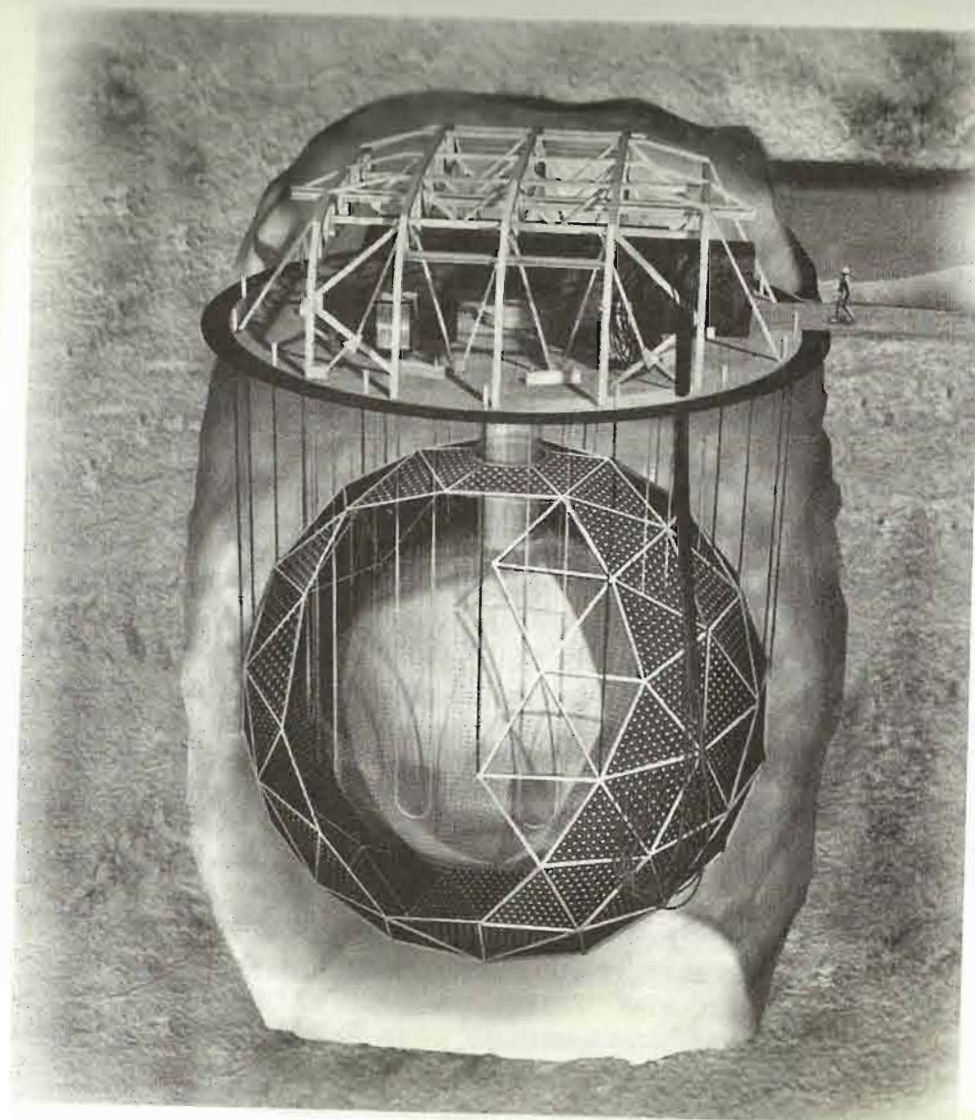
y



En la primera, un neutrino de electrón colisiona con el núcleo del deuterio, lo rompe y cambia el neutrón en un protón, emitiéndose un electrón. Esta reacción no puede producirse si el neutrino incidente es de otra familia (recuérdese que el número leptónico debe conservarse por familias). La segunda reacción es una colisión en la que el neutrino rompe el núcleo en sus dos constituyentes, un protón y un neutrón, que no pierden su identidad, y es, por tanto, una reacción posible para cualquiera de los tres tipos de neutrinos. Esta posibilidad, que abría el uso del agua pesada como detector, permitió resolver definitivamente el problema, ya que pudo medirse el flujo de neutrinos de electrón y compararlo con el flujo total de neutrinos (sumados los de las tres familias). El análisis combinado de los resultados del SNO con los que se habían obtenido en Super-K sobre neutrinos solares permitió establecer sin género de dudas que el número de neutrinos electrónicos era, aproximadamente, 1/3 del total y que, por tanto, los neutrinos oscilaban, cambiando de identidad en su viaje desde el centro del Sol donde eran producidos hasta la Tierra. Los investigadores principales de los experimentos Super-K y SNO, Takaaki Kajita y Arthur B. McDonald, respectivamente, recibieron por su hallazgo el premio Nobel de Física en 2015. Davis y Bahcall no se habían equivocado.

LA MASA DE LOS NEUTRINOS

Aparte del sorprendente hecho de las oscilaciones en sí, uno más en la larga lista que adornaba el comportamiento de los neutrinos, esa posibilidad de cambio de familia tenía otra implicación más que relevante: los neutrinos debían tener masa. Si no fuera



Recreación artística del detector SNO, en la que se muestran los principales detalles de su estructura. La persona representada en la pasarela superior da una indicación visual clara del tamaño del SNO. El corazón del detector era una esfera de 12 m de diámetro que albergaba unas 1 000 toneladas de agua pesada (agua con átomos de deuterio en sus moléculas). Esta esfera a su vez estaba situada dentro de otra estructura esférica que daba soporte a más de 9 000 tubos fotomultiplicadores. El conjunto se hallaba inmerso en agua normal, dentro de una cavidad excavada en la roca. La instalación, con las adaptaciones necesarias, se está aprovechando para un nuevo experimento, SNO+.

así, esas oscilaciones no podrían presentarse. Pero esto entraba en contradicción con el modelo estándar, en el que los neutrinos son partículas sin masa. ¿Cómo dilucidar esta discrepancia? Determinar la masa de los neutrinos experimentalmente no es fácil. En principio, en el caso del neutrino de electrón sería posible hacer una medida directa del espectro beta en algún caso concreto y estudiar en detalle cómo es la parte final de ese espectro. Esto se ha hecho para el núcleo del tritio, el isótopo más pesado del hidrógeno, que cuenta con un protón y dos neutrones. Se trata de un núcleo inestable, con una vida media de algo más de 17 años, y cuyo valor Q_β es de tan solo 18,6 keV. Evidentemente, cuanto menor sea este valor, más apreciables podrán ser los efectos debidos a la masa del neutrino. Pero, por otra parte, hay un problema técnico y es que, en esa parte final del espectro, el número de electrones detectados va siendo cada vez más pequeño y, en consecuencia, las incertidumbres de la medida son relativamente más grandes, lo que dificulta obtener un valor preciso. No obstante, se ha podido establecer con este procedimiento un límite superior a la masa del neutrino de electrón, que es de unos pocos eV.

Debido a esas dificultades se pensó en llevar a cabo experimentos «controlados» de oscilaciones. La idea era disponer de una fuente de neutrinos de características bien conocidas y enviar los neutrinos a un detector situado a una cierta distancia. La comparación de las medidas obtenidas con las que se encontrarían en otro detector situado junto a la fuente permitiría «medir» las oscilaciones y obtener información cuantitativa acerca de las masas de los neutrinos, más concretamente, del cuadrado de las diferencias entre sus masas. Muchos experimentos de este tipo empezaron a estar operativos desde finales del siglo xx. El primero de ellos fue el K2K, en el que un haz de neutrinos de muon, generados a partir de un haz de protones de 12 GeV producido en el sincrotrón del laboratorio KEK (Tsukuba, Japón), se envió hacia el Super-K, donde era detectado tras recorrer unos 250 km. A 300 m del blanco de aluminio donde se producían los neutrinos se dispuso un detector de 1 000 toneladas de agua, una versión reducida del Super-K, que actuaba como detector de re-

ferencia para determinar la composición del haz con buena precisión (97% de neutrinos de muon y el resto de antineutrinos de muon y neutrinos y antineutrinos de electrón). Los resultados confirmaron las observaciones anteriores respecto a las oscilaciones y permitieron establecer una estimación del cuadrado de la diferencia entre las masas de los neutrinos del tau y los del muon que se estableció en $\Delta m_{\tau\mu}^2 = 2,8 \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2/c^4$. El K2K estuvo operativo hasta 2004 y le sucedió otro experimento de similares características: el T2K. También utilizando un haz de neutrinos de muon, pero generado en el acelerador J-PARC situado en la costa este de Japón, en Tokai, y el Super-K como detector, a casi 300 km de la fuente, se consiguió observar directamente la oscilación de los neutrinos de muon a los de electrón que fue anunciada en 2013.

En Estados Unidos, varios experimentos del mismo tipo han hecho uso de la fuente de neutrinos NuMI del Fermilab. El primero de todos, operativo desde 2005 hasta 2012, fue MINOS, cuyo detector estaba situado a más de 700 m de profundidad en la mina Soudan, distante casi 750 km del Fermilab. En 2011 establecieron el valor $\Delta m_{\tau\mu}^2 = 2,32 \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2/c^4$ para la cantidad que había determinado el K2K previamente. En Europa también se realizaron experimentos similares, de los que cabe destacar a ICARUS y a OPERA. El primero empezó a producir datos en 2010. Se trata de un detector de 760 toneladas de argón líquido situado en el Laboratorio Nacional del Gran Sasso (que se mencionó anteriormente en relación con el experimento GALLEX) y que es irradiado por un haz de neutrinos producido en el sincrotrón de protones SPS del CERN, a 730 km de distancia. OPERA utiliza la misma fuente de neutrinos y está formado por 150 000 ladrillos detectores de más de 8 kg de peso cada uno, dispuestos en muros paralelos separados por contadores de plástico centelleador. Los ladrillos están constituidos por películas fotográficas separadas por láminas de plomo. En 2012, el equipo del ICARUS publicó los resultados obtenidos sobre medidas directas de la velocidad de los neutrinos, que resultó compatible con la velocidad de la luz, y que estaban de acuerdo con los encontrados por OPERA tras reanalizar sus primeros datos.

INFORMACIÓN EXTRAGALÁCTICA

Pero además de los neutrinos atmosféricos y solares, las fuentes extragalácticas han generado mucho interés desde que en 1987 se observaron, por accidente, los neutrinos generados por la supernova SN1987A. Kamiokande detectó 11 sucesos por encima del nivel de fondo, el IMB captó 8 y el BNO observó solo 5. Pero todos fueron detectados en un lapso de tiempo de solo 13 s, unas horas antes de que la supernova fuera observada por telescopios en la banda visible del espectro electromagnético, y se determinó que todos provenían de la Gran Nube de Magallanes, a unos 168 000 años-luz de distancia, la pequeña galaxia donde se produjo la explosión de supernova. A pesar de lo reducido del número de eventos observados, que correspondían a una cantidad total de neutrinos emitidos del orden de 10^{68} , permitieron establecer el límite de la masa del neutrino de electrón en $16 \text{ eV}/c^2$, algo superior al actualmente aceptado. También confirmaron las predicciones de los modelos estelares al respecto de la generación de estos fenómenos. Pero lo más importante es que abrieron la puerta de una nueva fuente de información sobre el universo. La extremadamente reducida capacidad de interacción de los neutrinos permite observar, al menos en principio, los producidos en cualquier proceso estelar, incluido el Big Bang. Pero es evidente que los flujos de neutrinos son muy bajos y su detección hace necesario contar con detectores gigantes.

ANTARES es un detector situado a 2,5 km bajo el mar Mediterráneo, al sur de Toulon (Francia). Se encuentra operativo desde 2008 y está constituido por 12 soportes verticales de unos 350 m de longitud, anclados en el fondo marino y separados unos de otros 70 m, cada uno conteniendo 75 tubos fotomultiplicadores. El objetivo es detectar, mediante técnicas de radiación Cherenkov, los neutrinos que entran en la Tierra por el polo sur con energías entre 10 GeV y 100 TeV. ANTARES es complementario de IceCube, un telescopio de neutrinos situado en la estación polar antártica de Amundsen-Scott, bajo el hielo. La construcción culminó en 2010 cuando se instalaron las últimas siete columnas de detectores de las 86 totales. Cada una consta de 60 módulos

ópticos digitales, que incluyen un fotomultiplicador, apuntando hacia el hemisferio norte y distribuidos a profundidades de entre 1 450 y 2 450 m. El volumen total ocupado por IceCube es de 1 km^3 y está diseñado para detectar neutrinos de energías superiores a 100 GeV. Aunque ya se han evidenciado varios centenares de eventos atribuidos a neutrinos extragalácticos, el camino no ha hecho más que empezar y las posibilidades que se prevén son extraordinarias.

Mientras, la masa de los neutrinos es aún un problema abierto que requerirá la realización de distintos experimentos como los que hemos descrito anteriormente. La repercusión que el valor de esa masa tenga, no solo en lo que respecta al modelo estándar, sino en otros ámbitos, como la astrofísica y la cosmología, queda por ver en los próximos años, aunque, casi con toda seguridad, la materia y la energía oscuras no le serán cuestiones ajenas.

REPERCUSIONES MÁS ALLÁ DE LA FÍSICA

Es muy probable que al lector que haya llegado hasta el final de este libro no le quepa la menor duda de la enormidad del coste económico de los experimentos que aquí se han descrito. En la mayor parte de los casos, como se ha mencionado, solo una decidida colaboración de distintos países y organizaciones internacionales ha permitido llevarlos a cabo. A pesar de ello, si el lector está convencido de la importancia de la investigación para el progreso de la sociedad, no serán necesarios argumentos añadidos que justifiquen esos importantes esfuerzos económicos.

Pero si no es ese el caso, es decir, si a pesar del relato que hemos realizado sobre las razones científicas que dieron pie a la realización de esos experimentos, el lector cuestiona su pertinencia, dada la inversión requerida, quizá sea interesante poner de manifiesto los resultados, no directamente relacionados con la física, que no se habrían revelado en caso de que estos experimentos no se hubieran llevado a cabo.

Un dato que usualmente se baraja alrededor de estos enormes laboratorios es que el retorno que producen multiplica por cua-

tro o cinco cada euro invertido inicialmente en ellos. Esto tiene implicaciones obvias: un incremento del trabajo especializado en las empresas de los países involucrados, con la consiguiente creación de riqueza, y una exigencia de modernización de las mismas. Este hecho, por sí mismo, bastaría para proporcionar un buen argumento para apoyar proyectos de este tipo.

Sin embargo, como se ha indicado, la puesta en marcha de estos experimentos requiere desarrollos que están en la frontera del saber de cada momento, imponiendo avances tecnológicos e industriales que difícilmente podrían alcanzarse en otras circunstancias. Nuevas técnicas de computación y almacenamiento e intercambio de información, progresos en superconductividad, electrónica de potencia, criogenia, técnicas de vacío extremo, etc., desafíos en ingeniería mecánica y de construcción u organización de grupos de trabajo, son algunos de los retos que deben superarse. Y la mayor parte de ellos originan nuevo conocimiento, que revierte de manera directa en nuestro día a día, dando lugar a muchas aplicaciones de las que sacamos provecho de manera cotidiana en muchos ámbitos de la vida.

No, no son las sociedades más ricas las que más invierten en ciencia sino que son las sociedades que más invierten en ciencia las que devienen más prósperas.

- BARTUSIAK, M., *La sinfonía inacabada de Einstein*, Barcelona, Editorial Océano Ambar, 2002.
- CABALLERO, J.A., *Los neutrinos. Las partículas elementales que todo lo atraviesan*, Barcelona, RBA, 2015.
- CASAS, A., *El LHC y la frontera de la física*, Madrid, CSIC/Los Libros de la Catarata, 2009.
- FLORES, J., *La gran ilusión III. Las ondas gravitacionales*, Madrid, Fondo de Cultura Económica, 2010.
- GÓMEZ, J.J., *El ecologista nuclear*, Barcelona, Espasa Libros, 2009.
- GÓMEZ, M.E., *El modelo estándar de partículas. Los pilares de la materia*, Barcelona, RBA, 2015.
- LOZANO, M., *Nucleares, ¿por qué no? Cómo afrontar el futuro de la energía*, Barcelona, DeBolsillo, 2010.
- NE'EMAN, Y. Y KIRSH, Y., *Los cazadores de partículas*, Barcelona, Gedisa, 2009.
- PASTOR, S., *Los neutrinos*, Madrid, CSIC/Los Libros de la Catarata, 2014.
- TAGLE, J.A., *La fusión nuclear*, Barcelona, Debate, 1995.

- acelerador lineal 95-98, 100-102, 104
 agua 25, 82, 83, 130, 135, 136, 138, 139, 141, 142
 pesada 25, 129, 139-141
 agujero negro 52, 53, 56-58, 61, 64, 76, 78
 ALICE 104, 105, 111, 113, 135
 antineutrino 128, 130, 133, 143
 ATLAS 105, 111, 114
 átomo 19, 26, 31, 39, 40, 52-55, 61, 84-88, 91-93, 96, 101, 132, 139, 141

 barión 89, 91, 94, 95, 108
 BNO 137, 144
 bosón 90, 91, 94, 103, 108, 110
 de Higgs 10, 110, 111, 115
 intermediario 90, 91, 96, 108, 110

 Cadarache 17
 campo
 poloidal 32, 33
 toroidal 32, 33
 cavidad resonante 74, 98
 CERN 10, 103-107, 113, 135, 143
 ciclotrón 34, 99, 100
 CMS 104, 105, 111, 114

 color (propiedad de los quarks) 95, 108, 109
 confinamiento
 inercial 30, 31, 38
 magnético 30-33, 36, 38-40
 conservación
 de la energía 18, 89, 119, 120, 123, 126
 del momento 120, 123
 criterio de Lawson 36, 38, 44
 Cygnus X-1 56

 DEMO 45
 desintegración
 alfa (α) 25, 119-121, 123
 beta (β) 25, 45, 89, 90, 119-121, 123, 126
 disco de acrecimiento (o disco de acreción) 56
 divertor 44

 eclipse 58-60
 electrón 23, 31-35, 37, 54, 55, 61, 62, 84, 86-88, 91, 93-95, 104, 106, 121-123, 126, 130-133, 136, 138-140, 142-144

energía
 de enlace 21, 22, 24
 eléctrica 17, 23, 38
 enlace químico 83, 84
 espín 54, 90-95, 122, 133
 estallido de rayos gamma 64

Fermilab 100, 101, 139, 143
 fermión 54, 90, 91, 94, 95
 fisión nuclear 17, 22-25, 124, 125, 128, 129
 fotón 24, 54, 90, 91, 95, 96, 109, 110, 130, 131
 fusión nuclear 9, 15-18, 20-23, 26-33, 36-45, 131
 Fusión para la Energía (F4E) 43

GALLEX 136, 137, 143
 GEO600 72, 74
 gluon 95, 96, 108, 109, 112
 GNO 137
 gravedad 49, 51, 52, 64, 78, 82
 gravitación universal, ley de la 50, 61
 gravitón 96, 114
 GSI 35, 100-102

hadron 89, 94, 103, 112
 Homestake, experimento 131

ICARUS 143
 ignición 38, 42, 44, 45
 IMB 138, 144
 interacción
 débil 89-91, 94, 108
 electromagnética 21, 89-91, 109
 fuerte 21, 89, 90, 94-96, 108, 109
 gravitatoria 21, 51, 89, 90, 96, 114
 interferómetro 69-72, 74, 75, 78
 isótopo 19, 24, 26, 34, 37, 39, 45, 85, 87, 96, 102-104, 119, 120, 123, 128, 130, 137, 142
 ITER 9, 16, 17, 39, 42-45

JET 41-44

K2K 142, 143
 KAGRA 72, 74

Kamiokande 130-138, 144
 kaon 88, 91

láser 30, 31, 39, 72-74
 LEP 106
 leptón 89, 91, 94, 96, 133, 134, 139
 tau 130, 139
 LHC 10, 104-107, 110-112, 114, 136
 LHCb 105, 111-114
 LHCf 111, 112
 LIGO 10, 47, 73, 75-77

mesón 89, 91, 95, 108, 112
 microonda 32, 62, 63, 65, 98
 MINOS 143
 modelo estándar 10, 81, 88, 95, 110, 114, 115, 142, 145
 MOEDAL 111, 112, 114
 molécula 74, 83-85, 139, 141
 muon 88, 91, 124, 129, 132-134, 138, 139, 142, 143

neutrino 11, 89, 91, 101, 105, 115, 117, 119, 126-130, 132-135, 138-140, 142-145
 atmosférico 136, 138, 144
 solar 131, 132, 134-140, 144
 neutrón 19-21, 23-25, 38, 39, 44, 45, 65, 67, 78, 88, 91, 94, 103, 104, 112, 120, 121, 124, 126, 129, 130, 139, 140, 142

núcleo atómico 18-29, 36-39, 43, 45, 86, 88, 90, 91, 95, 96, 98, 102-104, 120, 121, 123, 124, 126-129, 132, 134, 139, 140, 142

onda gravitatoria 10, 47, 61, 64-69, 72, 73, 76-78, 115
 continua 64, 66
 de estallido 64, 66
 estocástica 65, 66
 inspiral 64, 66, 76

OPERA 143

partícula
 Λ (lambda) 89, 91
 Σ (sigma) 91

Σ (xi) 91
 W^+ (W^+ y W^-) 94, 96, 109, 110
 Z_0 94, 96, 103, 110

partón 95
 pentaquark 112
 perihelio de Mercurio 51
 pion 88, 91, 108, 109, 124, 133, 138
 plasma 31-33, 36-40, 42-45, 102, 105, 112
 positrón 88, 106, 126, 130, 131, 139
 principio de equivalencia 49
 protón 19, 21, 23, 28, 64, 69, 88, 91, 93-95, 98, 100, 101, 103, 104, 106, 109, 112, 114, 120, 121, 126, 129, 130, 133, 136, 139, 140, 142, 143
 PSR 1913+16 65, 67, 68
 púlsar 65, 67, 68

quark 94-96, 101, 108, 109, 112

radiación
 Cherenkov 135, 136, 144
 de Bremsstrahlung (o de frenado) 33, 34, 36
 radio de Schwarzschild 53, 56
 radiofrecuencia 32, 97-100, 107
 rayos X 30, 53-57
 reactor de fusión 16, 28, 36-43, 45
 Reactor Experimental Termonuclear Internacional *véase* ITER
 Reactor Tokamak para la Prueba de la Fusión *véase* TFTR

SAGE 137
 Sagitario A* 56, 58
 sincrotrón 34, 99-104, 106, 142, 143

SNO 135, 139-141
 Sol 28, 39, 40, 43, 44, 51, 52, 54, 55, 58-61, 82, 131, 134, 140
 sistema periódico 86
 Super-K 73, 134, 135, 139-140, 142, 143
 supernova 64, 78, 144

TEK 143
 TAMAROO 72
 tau *véase* leptón tau
 teoría
 atómica de la materia 83
 cuántica/mecánica cuántica 61, 84, 93, 96, 122
 de la cromodinámica cuántica (QCD) 80
 de la relatividad 20, 50, 89, 122, 124
 de la relatividad especial 50
 de la relatividad general 9, 49, 52, 59-61, 67, 68, 78, 90, 115
 de los cuatro elementos 82
 electrodébil 89, 90, 94, 95
 Samkhya 83
 Wu Xing 83

tetraquark 112
 Tevatrón 100
 TFTR 41, 42
 Tierra 29, 49, 53, 56, 60-62, 71, 82, 96, 132, 134, 136, 139, 140, 144
 Toro Europeo Conjunto *véase* JETTOTEM 111, 112, 114
 tokamak 32, 33, 40-44

Vía Láctea 56, 62
 Virgo 72-74

Grandes experimentos de la física

La ciencia, en general, y la física, en particular, hacen uso de la experimentación como vía fundamental para poder verificar teorías y modelos que tratan de describir lo que ocurre en la naturaleza. La realización de experimentos resulta ser, por tanto, la pieza clave de lo que se ha dado en llamar «el método científico». El calificativo de «grande» que acompaña a los experimentos que se describen en este libro alude, por un lado, a su excelencia como investigación en el límite del conocimiento y, por otro, a sus colosales dimensiones físicas. Esta última característica hace de ellos proyectos con un costo económico tal que precisa la colaboración internacional. Pero, aun así, los beneficios que acarrearán para la ciencia y para la tecnología hacen de estos «grandes experimentos» actividades enormemente rentables para la sociedad.

Antonio M. Lallena es catedrático de Física Atómica, Molecular y Nuclear de la Universidad de Granada.